

## QUANTIFICATION DU POTENTIEL GEOTHERMIQUE AU DROIT DU TERRITOIRE DE LA REGION DE BRUXELLES-CAPITALE



BRUXELLES ENVIRONNEMENT

AVRIL 2024

## TABLE DES MATIERES

|   |          |
|---|----------|
| <b>TABLE DES MATIERES .....</b>   | <b>2</b> |
| <b>CONTENU .....</b>  | <b>3</b> |
| <b>OBJECTIF .....</b>   | <b>3</b> |
| <b>PUBLIC-CIBLE.....</b>  | <b>3</b> |
| 1 Introduction.....   | 4        |
| 2 Potentiel technique brut.....   | 5        |
| 2.1 Géothermie sur sondes (boucle fermée).....  | 5        |
| 2.1.1 Principe de la géothermie sur sondes .....  | 5        |
| 2.1.2 Méthodologie et résultats .....   | 6        |
| 2.2 Géothermie sur nappe (boucle ouverte) .....   | 8        |
| 2.2.1 Introduction.....   | 8        |
| 2.2.2 Limites .....   | 9        |
| 2.2.3 Méthodologie.....   | 9        |
| 2.2.4 Données et informations de base .....   | 11       |
| .2.2.4.1 Principe de la géothermie sur nappe .....  | 11       |
| .2.2.4.2 Contexte géologique et hydrogéologique de la Région de Bruxelles-Capitale (RBC)..... | 12       |
| .2.2.4.3 Extension des zones exploitables des aquifères cibles au droit de la RBC .....       | 17       |
| .2.2.4.4 Données thermiques de base .....   | 19       |
| .2.2.4.5 Base de données des installations géothermiques.....                                 | 21       |
| 2.2.5 Modélisation d'un doublet type exploitant l'aquifère des sables du Landénien .....      | 22       |
| .2.2.5.1 Profil d'exploitation d'un doublet type.....   | 22       |
| .2.2.5.2 Maillage en éléments finis .....   | 24       |
| .2.2.5.3 Modèle géologique .....  | 25       |
| .2.2.5.4 Conditions aux limites .....   | 25       |
| .2.2.5.5 Propriétés du sous-sol.....  | 27       |
| .2.2.5.5.1 Propriétés hydrodynamiques et hydrodispersives .....                               | 27       |
| .2.2.5.5.2 Propriétés thermiques .....  | 27       |
| .2.2.5.6 Calibration .....  | 28       |
| .2.2.5.7 Simulations.....   | 29       |
| 2.2.6 Modélisation d'un doublet type exploitant l'aquifère du Socle Paléozoïque .....         | 33       |
| .2.2.6.1 Profil d'exploitation d'un doublet type.....   | 33       |
| .2.2.6.2 Maillage en éléments finis .....   | 35       |
| .2.2.6.3 Modèle géologique .....  | 36       |
| .2.2.6.4 Conditions aux limites .....   | 36       |
| .2.2.6.5 Propriétés du sous-sol.....  | 38       |
| .2.2.6.5.1 Propriétés hydrodynamiques et hydrodispersives .....                               | 38       |
| .2.2.6.5.2 Propriétés thermiques .....  | 38       |
| .2.2.6.6 Calibration .....  | 39       |
| .2.2.6.7 Simulations.....   | 40       |

|            |   |    |
|------------|---|----|
| 2.2.7      | Modélisation d'un doublet type exploitant l'aquifère des sables du Bruxellien ..... | 44 |
| .2.2.7.1   | Profil d'exploitation d'un doublet type.....  | 44 |
| .2.2.7.2   | Maillage en éléments finis .....  | 46 |
| .2.2.7.3   | Modèle géologique .....   | 47 |
| .2.2.7.4   | Conditions aux limites .....  | 47 |
| .2.2.7.5   | Propriétés du sous-sol.....   | 49 |
| .2.2.7.5.1 | Propriétés hydrodynamiques et hydrodispersives .....                                | 49 |
| .2.2.7.5.2 | Propriétés thermiques .....   | 49 |
| .2.2.7.6   | Calibration .....   | 50 |
| .2.2.7.7   | Simulations .....   | 51 |
| 2.2.8      | Conclusion du potentiel théorique de la géothermie sur nappe en RBC .....           | 55 |
| 3          | Conclusion.....   | 57 |
| 4          | Bibliographie.....  | 58 |

## CONTENU

Ce rapport quantifie le potentiel géothermique extractible au droit du territoire de la Région de Bruxelles-Capitale par les technologies de géothermie sur nappe (boucle ouverte) et de géothermie sur champ de sondes (boucle fermée)

## OBJECTIF

Evaluer le potentiel géothermique de la Région de Bruxelles-Capitale dans le contexte de transition énergétique.

## PUBLIC-CIBLE

Division Energie de Bruxelles Environnement, Référents « Energie » régionaux, Experts et Gestionnaires de projet des filières « Energie », « Energie renouvelable », « Chaleur renouvelable », « Géosciences » et « Géothermie ».



# 1 INTRODUCTION

La Région de Bruxelles-Capitale (RBC) dispose d'un potentiel géothermique reconnu sur les 200 à 300 premiers mètres de profondeur. On estime qu'au-delà de 300 mètres, le potentiel géothermique est très limité rendant improbable tout potentiel en géothermie profonde (roches profondes du Socle Paléozoïque considérées peu perméables en l'état des connaissances acquises). Dans ce contexte, le type de géothermie déployable en RBC se limite à la **géothermie très basse énergie** (chauffage assisté par PAC et/ou refroidissement).

Ce rapport documente la quantification du **potentiel technique brut** d'énergie renouvelable relatif aux technologies de **géothermie sur nappe (boucle ouverte) et sur champ de sondes géothermiques (boucle fermée)** en Région de Bruxelles-Capitale. Il correspond au potentiel brut accessible, c'est-à-dire considérant tous les espaces et ressources disponibles sans autre contrainte. Son interprétation à l'échelle de la Région est liée à une approche optimiste.

La définition du potentiel technique brut se traduit par la quantification des paramètres ci-dessous :

- **Puissance géothermique maximale extractible** au sous-sol sur le territoire de la RBC (kW), en chaud comme en froid,
- **Energie géothermique extractible** annuellement au sous-sol sur le territoire de la RBC (kWh/an), chaud et froid cumulés,

Le potentiel technique brut :

- en géothermie sur sondes (boucle fermée) a été quantifié par le bureau d'étude Resolia (Auteur : Alexis RASSON) au travers d'une approche analytique basée sur des hypothèses d'énergie extractible par forage et de densité de sondes par unité de surface. La méthodologie et les résultats de cette étude sont détaillés au chapitre 2.1,
- en géothermie sur nappe (boucle ouverte) a été quantifié par Bruxelles Environnement (Auteur : Mathieu AGNIEL) au travers d'une approche numérique. La méthodologie générale appliquée a consisté en la construction d'un modèle numérique reproduisant l'environnement hydrogéologique « moyen » de chaque aquifère cible en RBC et la réalisation de simulations hydrodynamiques et thermiques sur le logiciel FEFLOW reproduisant l'exploitation sur 30 ans d'un « doublet type » (pompage/réinjection) selon des conditions d'exploitation jugées représentatives d'une exploitation « moyenne » en RBC. Ce type de simulation a *in fine* permis de quantifier une « emprise de gîte géothermique » unitaire. Par extrapolation de cette dernière sur l'emprise du territoire de la RBC, il a été alors possible de quantifier un potentiel géothermique extractible à l'échelle régionale. La méthodologie et les résultats de cette étude sont détaillés au chapitre 2.2.

D'autres technologies de géothermie plus superficielles telles que les pieux énergétiques, les systèmes horizontaux superficiels et les systèmes compacts (corbeilles ou murs géothermiques) ne font pas partie du cadre de cette étude.



## 2 POTENTIEL TECHNIQUE BRUT

### 2.1 Géothermie sur sondes (boucle fermée)

#### 2.1.1 Principe de la géothermie sur sondes

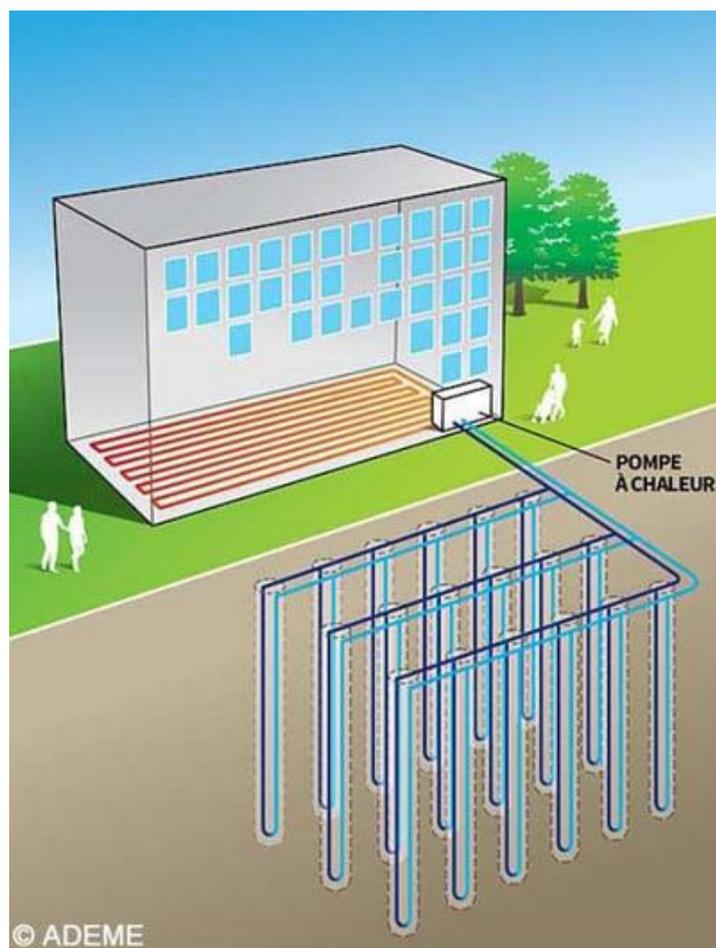
Auteur : Mathieu AGNIEL (Bruxelles Environnement)

La géothermie sur sondes (ou système fermé) exploite l'énergie thermique du sous-sol. Les calories sont prélevées par l'intermédiaire de sondes géothermiques de généralement 50 à 250 m de profondeur au sein desquelles un liquide caloporteur (mélange eau + glycol) transite.

En mode chauffage, le liquide caloporteur au sein des sondes se réchauffe au contact du sous-sol. Une fois sorti des sondes, il est acheminé vers une pompe à chaleur pour en prélever les calories puis est ensuite redirigé vers le champs de sondes à une température inférieure de quelques degrés par rapport à la température initiale en sortie de sondes.

En mode refroidissement, le processus s'inverse. Les calories excédentaires du bâtiment sont envoyées vers le champs de sonde par l'intermédiaire de la PAC (active cooling) ou en direct (geocooling). Le sous-sol naturellement frais va absorber ces calories. Le liquide caloporteur en sortie de sondes est alors refroidi de quelques degrés par rapport à la température initiale en sortie du bâtiment.

Figure 1 - Schéma de principe d'un système géothermique fermé (source : ADEME)



## 2.1.2 Méthodologie et résultats

Auteur : Alexis RASSON (Resolia)

Le potentiel en boucle fermée a été calculé selon 2 critères. Le premier est l'étude de la puissance et de l'énergie extractible dans un forage (ou une sonde) unique qui dépendent essentiellement des caractéristiques du sous-sol. Le second est la densité réaliste de sondes installées pour extraire la chaleur et le froid de manière durable. Grâce aux données du sous-sol (couches géologiques<sup>1</sup>, hauteurs piézométriques<sup>2</sup> et conductivités thermiques selon le milieu<sup>3</sup>) fournies par Bruxelles Environnement et à une norme reconnue<sup>4</sup>, il a été possible de calculer localement la puissance et l'énergie de cette sonde. Cela a été réalisé selon un découpage (ou une granularité) d'un hectare.

Toutefois, le sous-sol bruxellois atteint relativement rapidement la couche du Socle Paléozoïque. Dans certaines zones, le Socle se trouve à une profondeur de 30 mètres (et 195 m au maximum). Cette couche indurée fait que le foreur doit être outillé en conséquence pour poursuivre le forage. Deux cas de figure ont été distingués : soit le forage est stoppé à ce stade (lorsque le toit du Socle est atteint), soit le forage est poursuivi jusqu'à 200 m de profondeur. En effet, cette profondeur s'observe régulièrement dans les nouveaux projets.

Le second critère est la densité de sondes par unité de surface. Une interdistance de 7 m a été considérée sur base de la littérature existante et des demandes de permis traitées par BE. Elle correspond à 204 sondes/hectare. La multiplication de la puissance d'une sonde (calculée localement) par la densité de sondes et la surface de la zone analysée, permet de calculer le potentiel.

Enfin, des surfaces d'exclusion ont été considérées. En effet, il est proscrit de forer dans certaines zones protégées et il est peu réaliste de considérer le forage dans des zones où se trouvent des infrastructures. Voici la liste des zones considérées :

- La prévention de captage d'eau ;
- Le projet Métro Nord ;
- Les rails de chemin de fer (avec un tampon de 5 m) ;
- Les bâtiments existants ;
- Les voiries existantes.

Le tableau suivant résume les potentiels des deux types de forages considérés. Il est important de noter que le potentiel est doublé en forant à 200 m par rapport à l'arrêt du forage au droit du Socle susmentionné. Une des conclusions importantes de cette étude est que forer dans le Socle augmente considérablement le potentiel géothermique.

Le lien entre énergie et puissance est un taux de charge de 1850 h/an<sup>5</sup>. Également, en tenant compte des zones d'exclusion, le potentiel est divisé en 2 par rapport au potentiel total non contraint. Ces valeurs sont élevées ; la géothermie fermée est une source d'énergie renouvelable considérable en région bruxelloise.

Tableau 1 - Potentiel brut en géothermie fermée (production de chaleur)

| Régime de T°C  | Potentiel du sous-sol |            | Potentiel après exclusion |            |
|----------------|-----------------------|------------|---------------------------|------------|
|                | P (MW)                | E (GWh/an) | P (MW)                    | E (GWh/an) |
| Jusqu'au Socle | 10.300                | 19.000     | 5.600                     | 10.000     |
| Jusqu'à 200 m  | 23.300                | 43.000     | 12.600                    | 23.310     |

La production de froid a un potentiel identique à la production de chaleur. En effet, il est indispensable d'équilibrer la ressource entre le prélèvement de chaud et de froid. Dans le cas d'un déséquilibre avéré, le sous-sol se refroidit ou se réchauffe durablement dans le temps. Ceci doit être évité pour chaque projet car le risque d'épuiser localement la ressource existe. Pour ces raisons, RESOLIA a choisi la même durée de fonctionnement qu'en production de chaleur (1850 h/an).

<sup>1</sup> Modèle Brustrati3D - Modèle géologique Bruxellois

<sup>2</sup> <https://environnement.brussels/pro/gestion-environnementale/gerer-les-batiments-et-les-sites/hydrogeologie>

<sup>3</sup> [https://document.environnement.brussels/opac\\_css/elecfile/RAP\\_20200503\\_ULB\\_conductivites\\_thermiques.pdf](https://document.environnement.brussels/opac_css/elecfile/RAP_20200503_ULB_conductivites_thermiques.pdf)

<sup>4</sup> Norme suisse : SIA384/6 - Sondes géothermiques

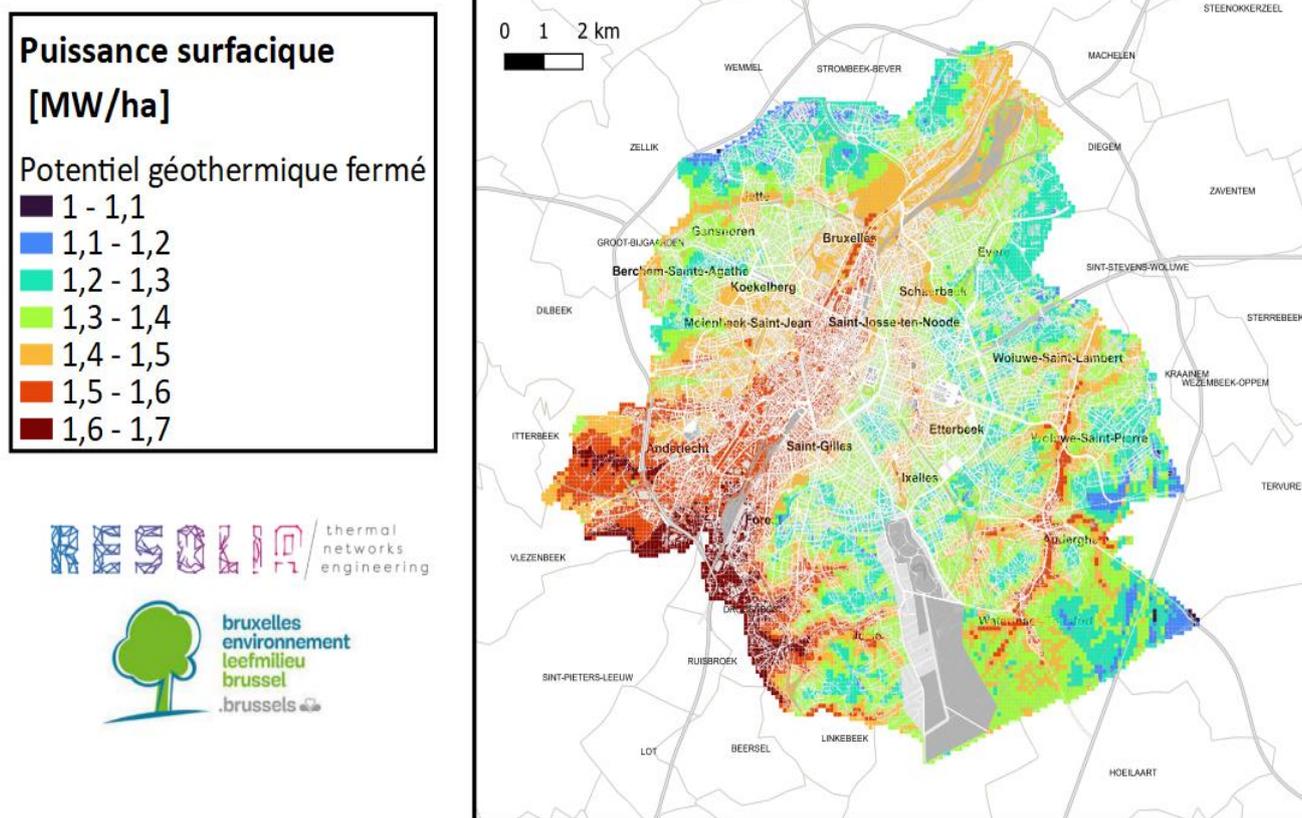
<sup>5</sup> Norme suisse : SIA384/6 - Sondes géothermiques



Techniquement, la production de froid se fait préférentiellement par voie passive. Ce type de refroidissement est également appelé *freecooling* ou *geocooling*. En effet, la température du sous-sol étant aux alentours des 10°C, il n'y a pas besoin d'une pompe à chaleur pour descendre le niveau de température. La consommation d'électricité est dès lors très faible.

La cartographie suivante affiche le potentiel à 200 m en affichant les zones d'exclusion.

Figure 2 – Cartographie de la puissance surfacique de la géothermie fermée avec un forage constant de 200 m



Il est important de noter que les zones avec le potentiel le plus faible (entre 1 et 1,3 MW) présentent la profondeur de Socle la plus élevée. Les coûts de forage y seront jusqu'à deux fois plus faibles que dans les zones où le Socle est proche de la surface. Les zones avec le potentiel le plus faible (presque 2 fois plus faible que les zones au meilleur potentiel), présentent des coûts de forage jusqu'à 2 fois plus faibles, on peut donc en conclure en première approche que le coût d'un forage géothermique à 200m de profondeur par unité de puissance installée varie peu à travers la Région.

## 2.2 Géothermie sur nappe (boucle ouverte)

Auteur : Mathieu AGNIEL (Bruxelles Environnement)

### 2.2.1 Introduction

La présente note s'intéresse à la **quantification du potentiel géothermique** théorique des unités hydrogéologiques aquifères présentes au droit du territoire de la **Région de Bruxelles-Capitale (RBC)** et jugées compatibles avec un usage géothermique en système ouvert :

- **Aquifère des sables du Bruxellien / Eocène moyen** (UH/RBC\_4 Aquifère des sables de Wemmel, Lede, Bruxelles et Vlierzele),
- **Aquifère des sables du Landénien / Paléocène supérieur** (UH/RBC\_8 Système aquifère des sables du Landénien),
- **Aquifère du Socle Paléozoïque / Cambrien** (UH/RBC\_9b Système aquifère du Socle Paléozoïque).

Il y a lieu de noter que l'aquifère des craies du Crétacé (UH/RBC\_9a Aquifère des craies du Crétacé), présent exclusivement sur la partie Nord de la RBC, ne fait pas partie du cadre de cette étude du fait d'un manque de données hydrogéologiques et d'un potentiel encore à démontrer.

L'emprise en sous-sol de ces aquifères restant limitée aux 300 premiers mètres de profondeur, l'usage qui peut en être fait se limitera à la **géothermie très basse énergie** (chauffage assisté par PAC et/ou refroidissement). En RBC, on estime qu'au-delà de 300 mètres, le potentiel géothermique est très limité rendant improbable tout potentiel en géothermie profonde (roches profondes du Socle Paléozoïque considérées peu perméables en l'état des connaissances acquises).

La méthodologie générale appliquée a consisté en la **construction d'un modèle numérique reproduisant l'environnement hydrogéologique « moyen » de chaque aquifère cible en RBC** et la **réalisation de simulations hydrodynamiques et thermiques sur le logiciel FEFLOW reproduisant l'exploitation sur 30 ans d'un « doublet type » (pompage/réinjection) selon des conditions d'exploitation jugées représentatives d'une exploitation « moyenne » en RBC.**

La définition du potentiel géothermique théorique pour chaque aquifère cible se traduit par la quantification des paramètres ci-dessous :

- **Puissance géothermique maximale extractible par unité de surface (kW/m<sup>2</sup>) et sur le territoire de la RBC (kW),**
- **Energie géothermique extractible par unité de surface (kWh/m<sup>2</sup>/an) et sur le territoire de la RBC (kWh/an).**



## 2.2.2 Limites

Le travail réalisé :

- se base sur une série de données statistiques, hypothèses simplificatrices et modèles numériques présentant un niveau d'incertitude significatif. Les résultats sont donc entachés de ces incertitudes et doivent être considérés comme des « ordres de grandeur réalistes »,
- constitue essentiellement une base scientifique permettant de disposer de valeurs de référence utiles à l'objectivation des potentialités énergétiques renouvelables et décarbonées de la RBC dans le cadre de sa transition énergétique,
- doit pouvoir à plus long terme être repris et perfectionné au travers de nouvelles études respectant un processus scientifique académique (analyses bibliographiques et statistiques poussées, analyse de sensibilité et/ou d'incertitudes, révision par les pairs,...)

## 2.2.3 Méthodologie

**Pour chaque aquifère cible**, la méthodologie de quantification du potentiel géothermique se base sur les étapes suivantes :

1. **Identification d'un scénario de besoins thermiques (appels de puissance coté sous-sol) pour une année de référence.** Ce travail a été mené par le bureau d'étude Resolia. Le scénario retenu tient compte des hypothèses ci-dessous :
  - a. bâtiment de logement collectif chauffé et rafraîchi par géothermie sur nappe,
  - b. puissance de pointe géothermique de 150 kW,
  - c. sollicitation thermique du sous-sol équilibrée du point de vue des besoins en chaud et en froid de sorte de se placer sous un angle d'exploitation maximale du potentiel du sous-sol.
2. **Estimation des paramètres de dimensionnement « moyens » théoriques représentatifs d'une « installation type de géothermie sur nappe » en RBC** sur la base des données du cadastre des installations géothermiques de Bruxelles Environnement, entre autres :
  - a. puissance calorifique et frigorifique de pointe extractible par doublet (kW/doublet) via la détermination des paramètres ci-dessous :
    - i. débit de pointe extractible par doublet (m<sup>3</sup>/h/doublet),
    - ii.  $\Delta T$  retenu pour la conception, soit la température moyenne entre le pompage et la réinjection (°C),
  - b. interdistance minimale entre puits chaud et puits froid (m).
3. **Estimation des paramètres physiques « moyens » théoriques représentatifs des propriétés « types » de l'aquifère cible en RBC** au droit des zones hydrogéologiquement exploitables (extension, épaisseur, niveau statique, gradient hydraulique, perméabilité, coefficient emmagasinement, porosité de transport, conductivité thermique, capacité massique, température moyenne,...),
4. **Constitution d'un modèle numérique via le logiciel FEFLOW représentatif de l'aquifère cible** en exploitant la synthèse des paramètres physiques « moyens » définie en 3/. Ceci permet de constituer un jumeau numérique simplifié reproduisant le comportement « moyen » de l'aquifère sur son extension exploitable au droit de la RBC,
5. **Implémentation d'un « doublet type » (pompage/réinjection) et simulation hydrodynamique et thermique d'une sollicitation géothermique de 30 ans sur ce doublet type** en exploitant la synthèse des paramètres physiques « moyens » définie en 2/ et les données du scénario thermique retenu en 1/,
6. **Quantification de l'emprise du gîte géothermique** définie comme l'« aire (m<sup>2</sup>) d'exploitation géothermique ». Ce concept fait l'hypothèse que chaque installation géothermique a une zone d'exploitation au-delà de laquelle les impacts environnementaux en terme de piézométrie et température du sous-sol doivent respecter une valeur maximale admissible. En outre, le respect de « non superposition des emprises » doit théoriquement permettre d'assurer l'absence de conflit



d'usage entre installations voisines. Les valeurs maximales admissibles par défaut définissant la limite d'emprise du gîte géothermique sont définies ci-dessous :

- a. **Impact thermique sur la nappe exploitée ( $\Delta_T$ ) égal à +/- 1°C** par rapport à la température initiale et après 30 ans d'exploitation continue,
  - b. **Impact piézométrique sur la nappe exploitée ( $\Delta_h$ ) :**
    - i. **pour la nappe phréatique des sables du Bruxellien : égal à +/- 1.0 m** par rapport au niveau statique initial et dans une projection d'exploitation maximale continue (soit un ordre de grandeur équivalent à 50% de l'amplitude piézométrique observée sur la période 2010-2023 pour cette nappe - cf chap .2.2.4.2),
    - ii. **pour les nappes captives des sables du Landénien et Socle Paléozoïque : égal à +/- 2.0 m** par rapport au niveau statique initial et dans une projection d'exploitation maximale continue (soit l'ordre de grandeur de l'amplitude piézométrique observée sur la période 2010-2023 pour ces nappes - cf chap .2.2.4.2),
7. **Quantification du potentiel géothermique** sur la base de la quantité d'énergie géothermique exploitée par le doublet type, rapportée à la surface de l'emprise du gîte géothermique. Ceci permet la quantification des paramètres ci-dessous :
- a. Puissance géothermique maximale extractible au sous-sol sur le territoire de la RBC (kW), en chaud comme en froid,
  - b. Energie géothermique extractible annuellement au sous-sol sur le territoire de la RBC (kWh/an), chaud et froid cumulés.



## 2.2.4 Données et informations de base

### 2.2.4.1 Principe de la géothermie sur nappe

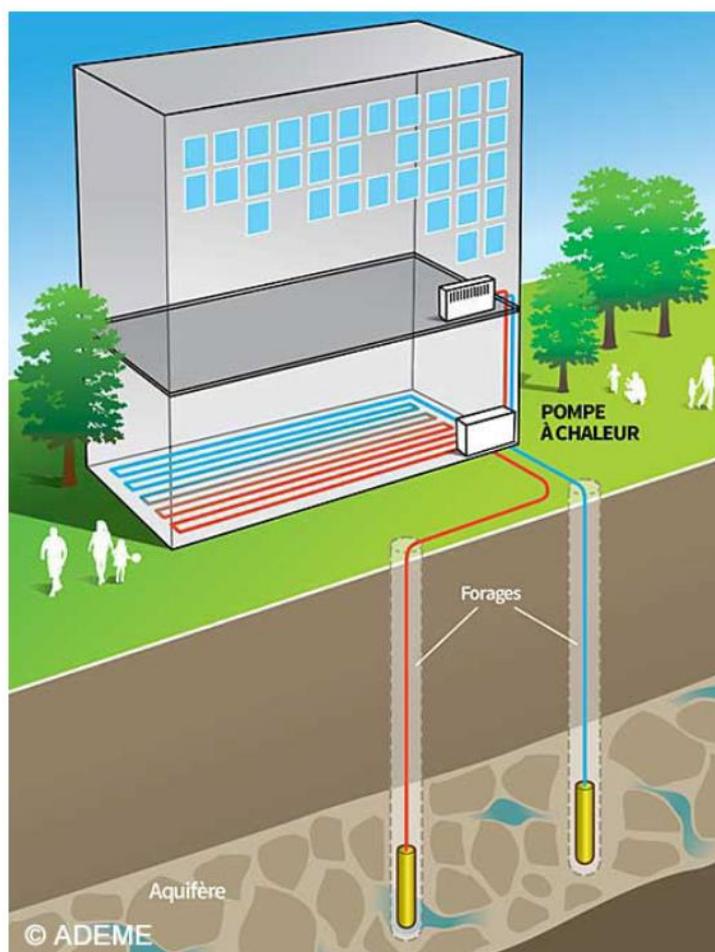
La géothermie sur nappe (ou système ouvert) exploite l'énergie thermique de l'eau souterraine issue d'un aquifère. L'eau souterraine est prélevée par l'intermédiaire d'un ou plusieurs forages de pompage (appelés puits producteurs).

En mode chauffage, elle est pompée et acheminée vers une pompe à chaleur pour en prélever les calories puis est ensuite réinjectée dans le même aquifère à une température inférieure de quelques degrés par rapport à la température initiale de pompage par l'intermédiaire d'un ou plusieurs forages de réinjection.

En mode refroidissement, l'eau pompée suit un processus similaire. Elle est acheminée vers la même pompe à chaleur (ou vers un échangeur à plaque sans passage par une pompe à chaleur, dans le cas du geocooling), est chargée des calories excédentaires du bâtiment puis est ensuite réinjectée dans le même aquifère au niveau des puits injecteurs à une température supérieure de quelques degrés par rapport à la température initiale de pompage.

**Il y a lieu de préciser qu'en RBC, les systèmes géothermiques sur nappe sont exclusivement de type ATES (Aquifère Thermal Energy Storage), c'est-à-dire que les puits de pompage et réinjection sont réversibles en fonction des saisons. Ce concept permet une maximisation des rendements et une minimisation des incidences thermiques en sous-sol du fait d'une valorisation du stockage thermique inter-saisonnier. Cet état de fait en RBC peut être expliqué par le fait que les systèmes existants exploitent exclusivement les aquifères des sables du Landénien et du Socle Paléozoïque caractérisés par des vitesses d'écoulement très faibles (< 50 m/an), rendant ce type de dimensionnement particulièrement pertinent.**

Figure 3 - Schéma de principe d'un système ouvert – système ATES réversible (source : ADEME)



### .2.2.4.2 Contexte géologique et hydrogéologique de la Région de Bruxelles-Capitale (RBC)

Les figures ci-dessous reprennent en synthèse les éléments relatifs au contexte géologique et hydrogéologique de la RBC :

Figure 4 - Contexte géologique et hydrogéologique de la Région de Bruxelles-Capitale (source : AGNIEL, M. (2021), Supporting the sustainable development of Brussels by modelling and visualizing its subsoil, 48th IAH Congress, Brussels)

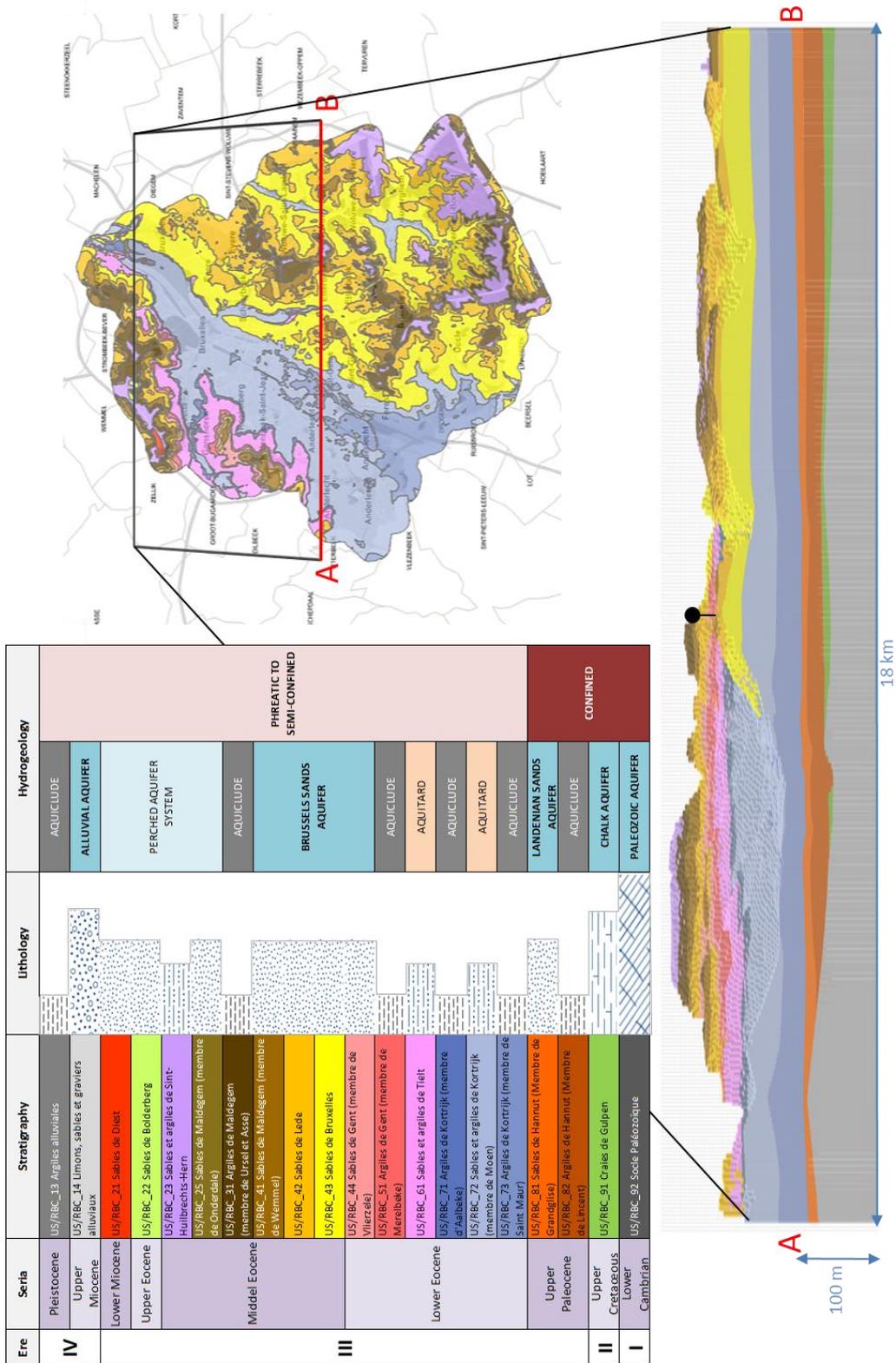


Tableau 2 - Unités stratigraphiques composant le sous-sol bruxellois ainsi que leur description lithologique (source : carte géologique 31-39 de Bruxelles-Nivelles)

| Ere  | Système  | Série | Etage | Age absolu (millions d'années) | Formation  | Unités Stratigraphiques (US/RBC)   | Description  |  |  |                             |  |
|--|--|-------|-------|--------------------------------|--|--|--|--|--|-----------------------------|--|
| IV (Cénozoïque)  | Quaternaire  |       |       |                                |  | US/RBC_11 Remblais   | Remblais.  |  |  |                             |  |
|  |  |       |       |                                |  | US/RBC_12 Couverture limoneuse   | Dépôt de bess, limons d'origine éolienne, fin, sableux, homogène sur les plateaux et stratifiés sur les versants, chargé de matières argileuses, calcaireux / Ollivium caillouteux des plateaux.   |  |  |                             |  |
|  |  |       |       |                                |  | US/RBC_13 Argiles alluviales   |  |  |  |                             |  |
|  |  |       |       |                                |  | US/RBC_14 Limons, sables et graviers alluviaux   | Dépôt successif de tourbes et d'argiles. Origine fluviale. Limité aux vallées alluviales.  |  |  |                             |  |
|  |  |       |       |                                |  | US/RBC_21 Sables de Diest  | Dépôt de sables grossiers, graviers et limons. Présence de couches fines d'argiles, de silex. Mouvements du sol dûs aux gels et dégels successifs. Limité aux vallées alluviales.  |  |  |                             |  |
|  |  |       |       |                                |  | US/RBC_22 Sables de Bolderberg   | Sable fin, jaune pâle, micacé ("sable chamois"). A la base, présence d'un gravier de petits silex. L'épaisseur maximale atteint 7 m.   |  |  |                             |  |
|  |  |       |       |                                |  | US/RBC_23 Sables et argiles de Sint-Hubrechts-Hern   | Sable fin, jaune, micacé, passant graduellement de haut en bas à une argile ou un silt jaune blanc à gris rose ("argile saumon"), légèrement sableux et glauconieux, suivi d'une argile grise à grise verte, sableuse et plus glauconieuse. A la base, présence d'un gravier de quartz, de silex tantôt plats noirs, tantôt de plus grandes tailles et ovales. Parfois, présence de galets de gris-vert cambrien. L'épaisseur est réduite au nord mais peut atteindre plus de 10 m au sud-est. |  |  |                             |  |
|  |  |       |       |                                |  | US/RBC_24 Argiles de Maldegem (membre de Zomergem)   | Argile grise à grisbleu, compacte, ne contenant pas de glauconie ni de calcaire. L'épaisseur moyenne est de 2 m (uniquement présent au nord).  |  |  |                             |  |
|  |  |       |       |                                |  | US/RBC_25 Sables de Maldegem (membre de Ouderdal)  | Sable fin moyen, gris foncé, siltueux, glauconieux et micacé. L'épaisseur moyenne est de 7 m (uniquement présent au nord).   |  |  |                             |  |
|  |  |       |       |                                |  | III (Cénozoïque)   | Paléogène  |  |  |                             | US/RBC_31 Argiles de Maldegem (membre de Urseel et Aase)   |
| US/RBC_41 Sables de Maldegem (membre de Wemmel)          | Sable fin, gris, très glauconieux. Le passage en argile augmente vers le sommet. Ce membre est caractérisé par la présence de Nummulites wemmelensis et d'une couche de base bien développée, riche en nummulites remaniés et roulés, ainsi qu'en fragments de grès calcaire fossilifères. L'épaisseur est très variable mais atteint en moyenne 5 m.  |       |       |                                |  |  |  |  |  |                             |  |
| US/RBC_42 Sables de Ledes                                | Sable fin, fin, carbonaté et légèrement glauconieux. Le sable est caractérisé par quelques bancs de calcaire sableux et par la présence de Nummulites variolarius, quand le sable n'est pas altéré. Vers la base, présence de niveaux plus grossiers et tout à la base, d'un gravier bien marqué avec des éléments remaniés. L'épaisseur maximale atteint 12 m.  |       |       |                                |  |  |  |  |  |                             |  |
| US/RBC_43 Sables de Brueilles                            | Sables quartzeux, fins à grossiers, hétérogènes et très faiblement glauconieux, caractérisés par la présence de bancs durs de calcaire sableux "scélés de gobertange - bancs de grès carbonatés, parfois silicifiés" et/ou par des nodules de grès de formes très capricieuses. Quand le sédiment est calcaire, la présence de Nummulites laevigatus est typique. Etant donné la structure en chenaux éroifs à la base, l'épaisseur est très variable et peut atteindre dans un chenal plus de 20 m. |       |       |                                |  |  |  |  |  |                             |  |
| US/RBC_44 Sables de Gent (membre de Vlierzele)           | Sable gris vert, très fin, glauconieux, plus argileux vers la base. L'épaisseur est restreinte à 4 m.  |       |       |                                |  |  |  |  |  |                             |  |
| US/RBC_51 Argiles de Gent (membre de Merelbete)          | Argile gris vert avec des zones sableuses vertes. Parfois, présence de pyrite. L'épaisseur maximale est de 4 m.  |       |       |                                |  |  |  |  |  |                             |  |
| US/RBC_61 Sables et argiles de Telt                      | Dépôt hétérogène de sable fin, glauconieux et micacé, alternant avec des couches d'argile. Localement, présence de fragments de grès. L'épaisseur moyenne est de 30m.  |       |       |                                |  |  |  |  |  |                             |  |
| US/RBC_71 Argiles de Kortrijk (membre d'Abbeke)          | Argile grise à gris brun, très finement siltueuse. L'épaisseur moyenne est de 4 m.   |       |       |                                |  |  |  |  |  |                             |  |
| US/RBC_72 Sables et argiles de Kortrijk (membre de Moen) | Dépôt hétérogène de sable siltueux à argileux, faiblement glauconieux, avec quelques couches d'argile. Présence de nummulites. L'épaisseur moyenne est de 35 m.  |       |       |                                |  |  |  |  |  |                             |  |
| II (Mésozoïque)  | Crétacé  |       |       |                                | US/RBC_73 Argiles de Kortrijk (membre de Saint-Maur) |  |  |  |  |                             | Argile très finement siltueuse avec quelques minces intercalations d'argile grossièrement siltueuse ou de silt très fin argileux. L'épaisseur moyenne est de 30 m. Membre de Mont-Helbu Incus.   |
|  |  |       |       |                                | US/RBC_81 Sables de Hamut (Membre de Grandjeu)       | Sable fin, glauconieux, avec intercalations argileuses minces. L'épaisseur moyenne est de 8 m.   |  |  |  |                             |  |
|  |  |       |       |                                | US/RBC_82 Argiles de Hamut (Membre de Lincent)       | Argile gris vert, légèrement sableuse, localement cimentée par de l'opale. A la base, quelques galets de silex vert foncé. Vers le nord, l'épaisseur atteint 20 m. |  |  |  |                             |  |
|  |  |       |       |                                | US/RBC_91 Craies de Gulpen                           | Craies blanches à grises avec silex noirs, appartenant probablement à la formation de Gulpen.  |  |  |  |                             |  |
|  |  |       |       |                                | I (Paléozoïque)                                      | Cambrien   |  |  |  | US/RBC_92 Socle paléozoïque | Dominance de bancs de grès feldspathique, schiste et quartzites d'âge supposé cambrien inférieur (ou éventuellement précambrien). L'absence de fossile rend leur datation difficile. Ces roches peuvent s'altérer sous la forme d'argile compacte. |
|  |  |       |       |                                |  |  |  |  |  |                             |  |
|  |  |       |       |                                |  |  |  |  |  |                             |  |
|  |  |       |       |                                |  |  |  |  |  |                             |  |
|  |  |       |       |                                |  |  |  |  |  |                             |  |
|  |  |       |       |                                |  |  |  |  |  |                             |  |
|  |  |       |       |                                |  |  |  |  |  |                             |  |
|  |  |       |       |                                |  |  |  |  |  |                             |  |
|  |  |       |       |                                |  |  |  |  |  |                             |  |
|  |  |       |       |                                |  |  |  |  |  |                             |  |



Les figures suivantes reprennent l'extension totale et la piézométrie si disponible (mai 2013) pour les trois aquifères cibles :

Figure 5 - Extension de l'aquifère des sables Bruxellien en RBC (UH/RBC\_4) et piézométrie de mai 2013 selon modèle BPSM (source : BrugoTool)

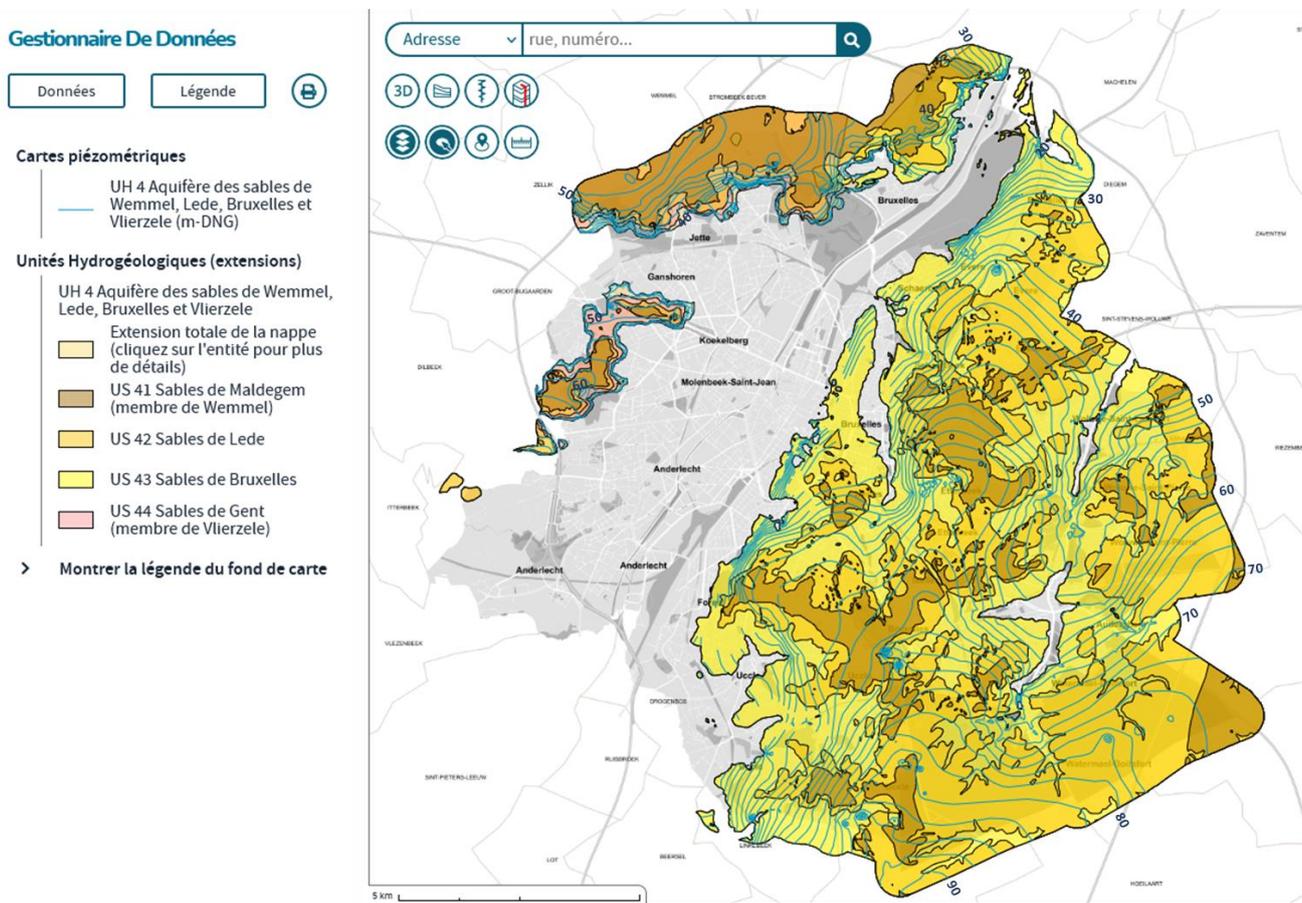
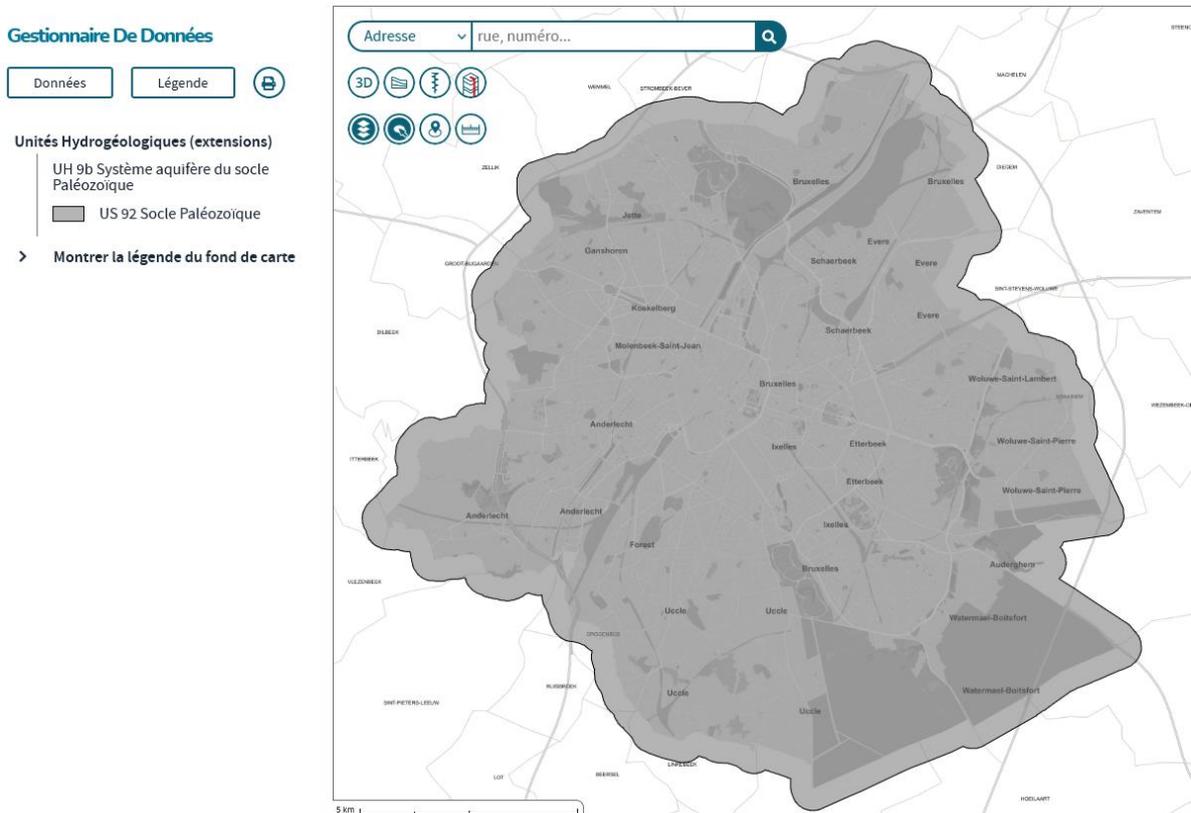


Figure 6 - Extension de l'aquifère des sables Landénien en RBC (UH/RBC\_8) et piézométrie de mai 2013 selon le modèle HYDROLAND (source : BrugeoTool)

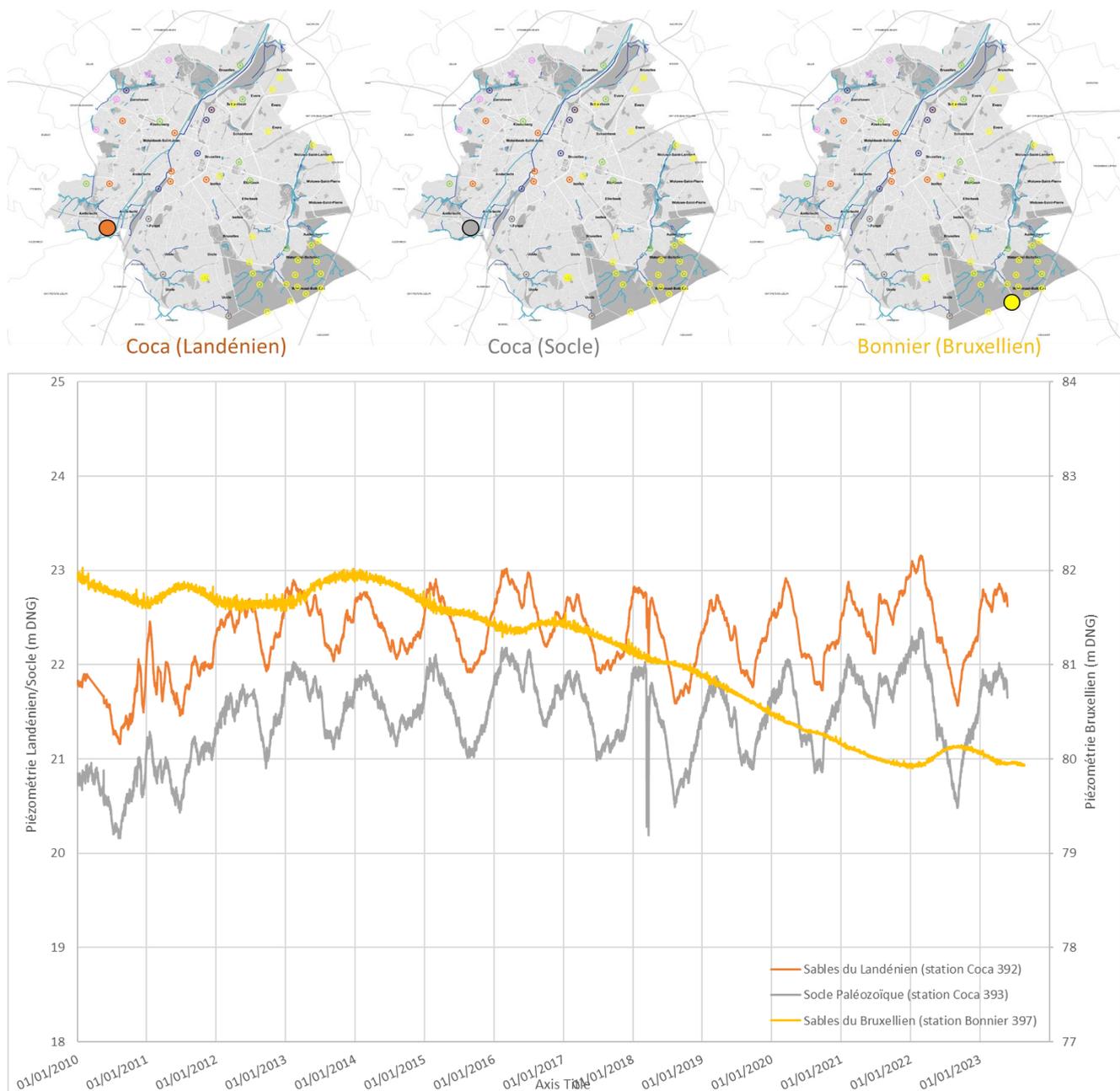


Figure 7 - Extension de l'aquifère du Socle Paléozoïque en RBC (UH/RBC\_9b) (source : BrugeoTool)



La figure suivante reprend la localisation des stations piézométriques Coca (Landénien), Coca (Socle) et Bonnier (Bruxellien), ainsi que les chroniques piézométriques relatives à ces trois piézomètres suivis par Bruxelles Environnement (période 2010 – 2023). Ces trois piézomètres constituent des stations piézométriques de « référence » permettant une appréciation des évolutions piézométriques générales de chaque masse d'eau. Elles sont notamment exploitées dans le cadre de l'évaluation de l'état quantitatif de chaque masse d'eau souterraine.

Figure 8 - Localisation des stations piézométriques Coca (Landénien), Coca (Socle) et Bonnier (Bruxellien) / Chroniques piézométriques (période 2010 – 2023) (source : BruWater)



Le tableau ci-dessous reprend les minimas, maximas et amplitudes piézométriques quantifiées sur la période 2010-2023 :

Tableau 3 - Minimales, maximales et amplitudes piézométriques quantifiées sur la période 2010-2023

|                      | Maxima piézométrique (m DNG) | Minima piézométrique (m DNG) | Amplitude (m) |
|----------------------|------------------------------|------------------------------|---------------|
| Coca (Landénien)     | 23,16                        | 21,16                        | 2,00          |
| Coca (Socle)         | 22,39                        | 20,16                        | 2,23          |
| Bonnier (Bruxellien) | 82,03                        | 79,9                         | 2,13          |

On en déduit qu'une amplitude de +/- 2 m est un ordre de grandeur représentatif de l'évolution piézométrique récente des trois nappes cibles.

Pour plus d'information, la documentation ci-dessous reprend plus en détail les caractéristiques géologiques et hydrogéologiques des trois aquifères cibles :

- [BRUSTRATI3D v1.0, Modélisation stratigraphique en 3D du sous-sol de la Région de Bruxelles-Capitale, X. Devleeschouwer, B. Meyvis, Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique, 2017.](#)
- [Brussels Phreatic System Model \(BPSM\), Modélisation hydrogéologique en éléments finis du système phréatique bruxellois, M. Agniel, Bruxelles Environnement, 2020](#)
- [Etude hydrogéologique de la masse d'eau souterraine des sables du Landénien - Phase 1: Modélisation géologique, X. Devleeschouwer, B. Meyvis, Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique, 2015](#)
- [Etude hydrogéologique de la masse d'eau souterraine des sables du Landénien - Phase 2 : Modélisation hydrogéologique, Aqualé, 2016. Pages 1 à 133](#)
- [Etude hydrogéologique de la masse d'eau souterraine des sables du Landénien - Phase 2 : Modélisation hydrogéologique, Aqualé, 2016. Pages 134 à 278](#)

#### .2.2.4.3 Extension des zones exploitables des aquifères cibles au droit de la RBC

La surface techniquement exploitable de l'aquifère des sables du Landénien (Figure 6) couvre l'entièreté du territoire de la RBC.

La surface techniquement exploitable de l'aquifère du Socle Paléozoïque (Figure 7) couvre approximativement 79% du territoire de la RBC. En effet les récentes recherches pilotées sur le potentiel géothermique du Socle Paléozoïque au travers du projet GEOCAMB (projet BELSPO BRAIN-be 2.0) ont permis d'estimer, sur la base de 20 sites exploratoires, un taux de réussite des études de faisabilité approchant 79% (C. Baudinet et.al. 2022). Dans 21% des cas, les débits extraits n'étaient pas suffisants pour projeter une exploitation géothermique rentable.

La surface techniquement exploitable de l'aquifère des sables du Bruxellien (Figure 5) ne couvre qu'une partie du territoire de la RBC. Les deux limites principales sont les suivantes :

- Extension partielle de l'aquifère se limitant plutôt aux zones de plateaux (et plus particulièrement aux zones en rive droite de la Senne) ;
- Epaisseur saturée limitée notamment sur les zones périphériques de l'aquifère (aval hydrogéologique). On considèrera ici par défaut qu'une épaisseur saturée minimale de 10 m constitue une condition technique minimale à respecter pour assurer un fonctionnement pérenne d'une installation géothermique exploitant cet aquifère.

Il y a lieu d'ajouter la zone d'exclusion de forage géothermique que constitue la zone de protection de captage (zone 3), soit prêt de 8.7 km<sup>2</sup>. Il est proposé de soustraire cette aire à la surface techniquement exploitable de chaque aquifère cible afin d'estimer sa surface exploitable.

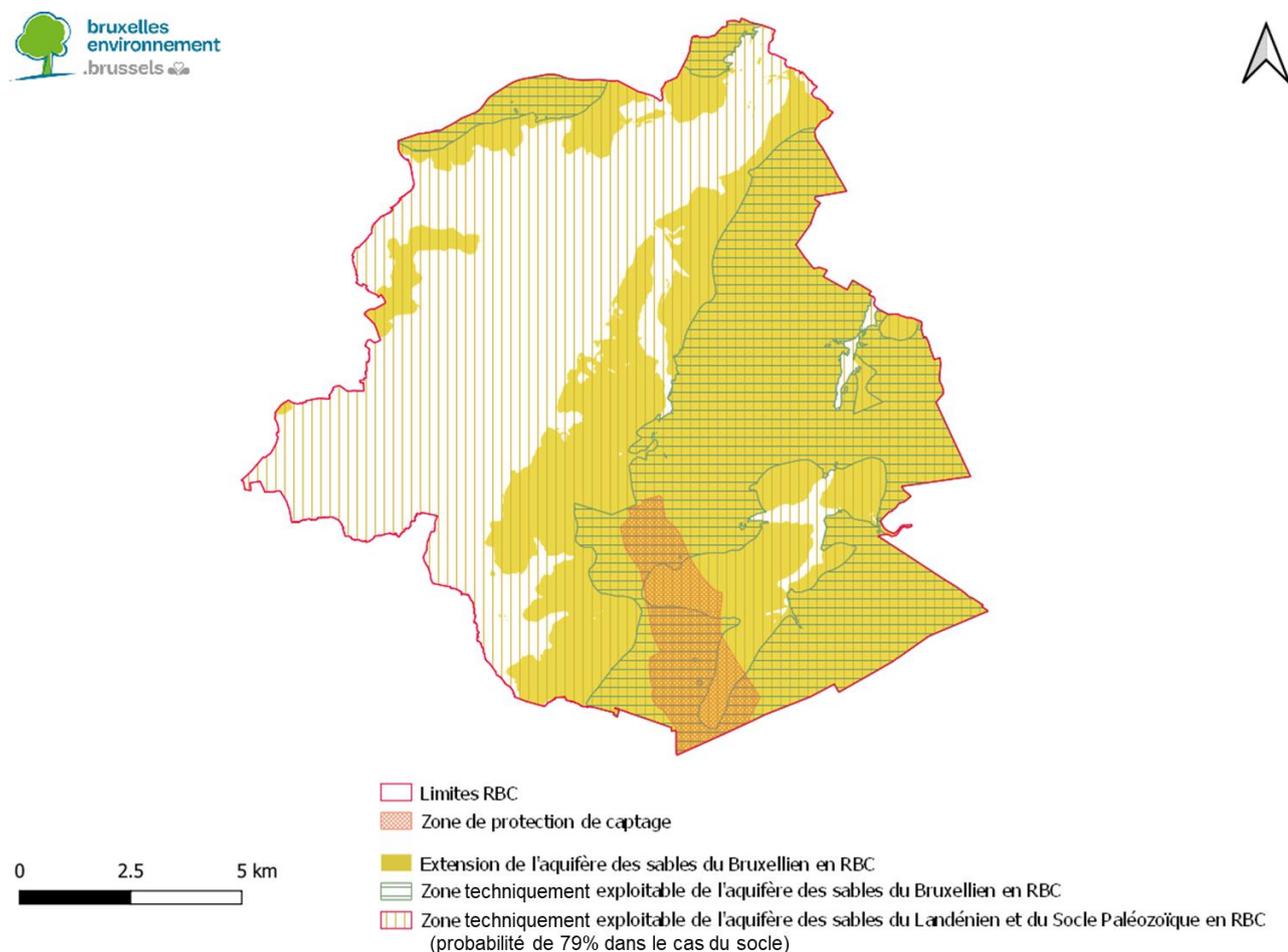


Le tableau ci-dessous synthétise les valeurs rentrant dans le calcul des surfaces exploitables :

Tableau 4 - Valeurs rentrant dans le calcul des surfaces exploitables

| Paramètres  | Valeur  |
|---|---|
| Surface de la RBC   | 161.380.000 m <sup>2</sup>                                      |
| Surface de la zone de protection de captage (exclusion forages géoth.)                              | 8.661.437 m <sup>2</sup>  |
| Surface de l'aquifère des sables du Landénien techniquement exploitable                             | 161.380.000 m <sup>2</sup>                                      |
| Surface de l'aquifère du Socle Paléozoïque techniquement exploitable                                | 127.490.200 m <sup>2</sup>                                      |
| Surface de l'aquifère des sables du Bruxellien techniquement exploitable (épaisseur saturée > 10 m) | 59.383.320 m <sup>2</sup>                                       |
| <b>Surface de l'aquifère des sables du Landénien exploitable</b>                                    | <b>152.718.563 m<sup>2</sup></b><br><b>(soit 95% de la RBC)</b> |
| <b>Surface de l'aquifère du Socle Paléozoïque exploitable</b>                                       | <b>120.647.665 m<sup>2</sup></b><br><b>(soit 75% de la RBC)</b> |
| <b>Surface de l'aquifère des sables du Bruxellien exploitable</b>                                   | <b>53.183.525 m<sup>2</sup></b><br><b>(soit 33% de la RBC)</b>  |

Figure 9 - Extension des zones exploitables des aquifères cibles au droit de la RBC

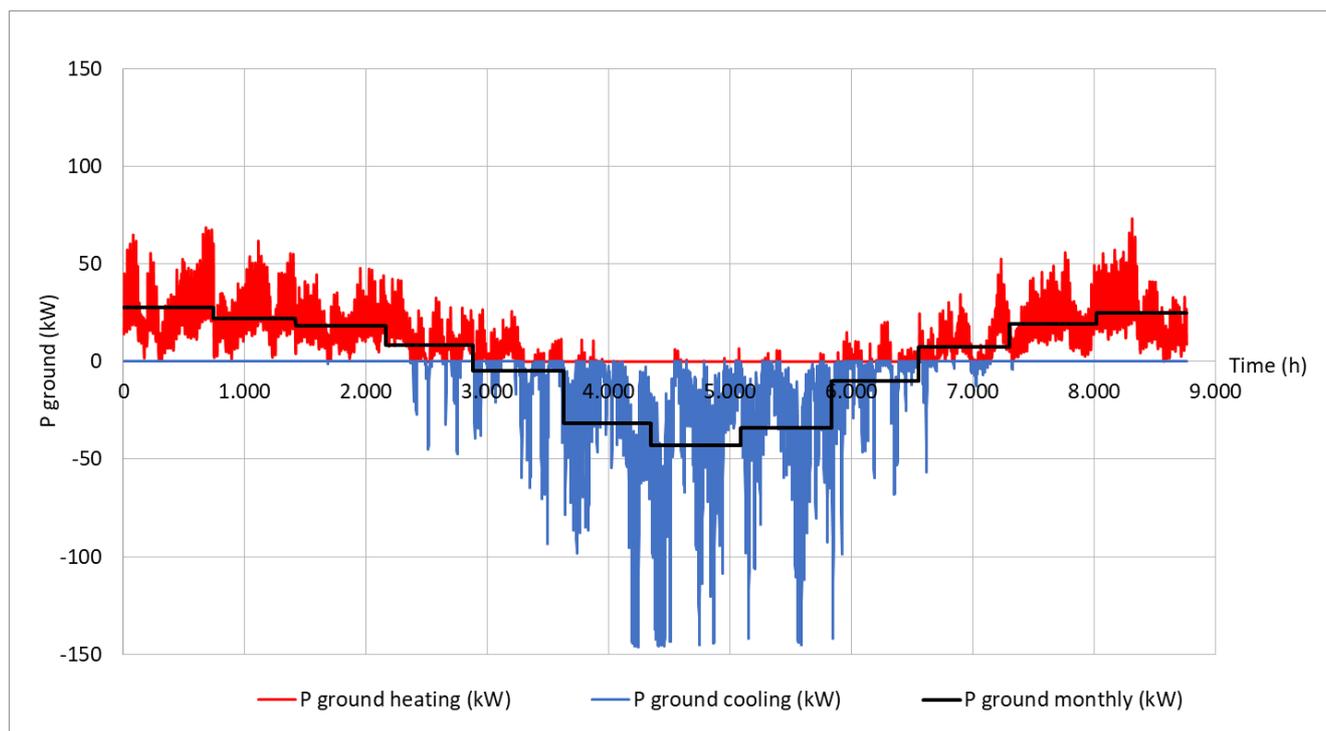


#### .2.2.4.4 Données thermiques de base

La figure suivante reprend un scénario des besoins thermiques (appels de puissance coté sous-sol) pour une année de référence. Ce travail a été mené par le bureau d'étude Resolia. Le scénario retenu tient compte des hypothèses ci-dessous :

- bâtiment de logement collectif chauffé et rafraîchi par géothermie sur nappe,
- puissance de pointe géothermique de 150 kW,
- sollicitation thermique du sous-sol équilibrée du point de vue des besoins en chaud et en froid de sorte de se placer sous un angle d'exploitation maximale du potentiel du sous-sol.

Figure 10 - Scénario de besoins thermiques (appels de puissance coté sous-sol) pour une année de référence (Source : Resolia)



Le tableau ci-dessous reprend le bilan thermique mensuel du point de vue :

- de la production géothermique (paramètre *E ground monthly* exprimé en kWh),
- des puissances géothermiques moyennes et maximales déployées (paramètres *P ground monthly* et *P ground max* exprimés en kW).

Il y a lieu de préciser que les paramètres *P ground monthly* et *P ground max* sont également exprimés en % (/100) de la puissance crête géothermique (coef / *P ground max*). Ces valeurs seront exploitées pour l'ensemble des simulations réalisées sur FEFLOW.

Tableau 5 – Bilan thermique mensuel de référence

| Months  | <b>E ground monthly</b> | <b>P ground monthly</b> |                     | <b>P ground max</b> |                     |
|---------|-------------------------|-------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|         | value (kWh)             | value (kW)              | coef / P ground max | value (kW)          | coef / P ground max |
| 1       | 20.520                  | 27,58                   | 0,19                | 68,1                | 0,47                |
| 2       | 16.291                  | 24,24                   | 0,17                | 61,2                | 0,42                |
| 3       | 13.556                  | 18,22                   | 0,12                | 47,5                | 0,32                |
| 4       | 6.187                   | 8,59                    | 0,06                | 41,8                | 0,29                |
| 5       | -3.680                  | -4,95                   | -0,03               | -93,1               | -0,64               |
| 6       | -23.669                 | -32,87                  | -0,22               | -146,1              | -1,00               |
| 7       | -31.991                 | -43,00                  | -0,29               | -145,9              | -1,00               |
| 8       | -25.289                 | -33,99                  | -0,23               | -144,7              | -0,99               |
| 9       | -7.497                  | -10,41                  | -0,07               | -141,4              | -0,97               |
| 10      | 5.625                   | 7,56                    | 0,05                | 52,0                | 0,36                |
| 11      | 14.129                  | 19,62                   | 0,13                | 55,7                | 0,38                |
| 12      | 18.472                  | 24,83                   | 0,17                | 72,7                | 0,50                |
| Balance | 2.652                   |                         |                     |                     |                     |



## .2.2.4.5 Base de données des installations géothermiques

Le tableau ci-dessous reprend l'ensemble des informations de base du cadastre des installations géothermiques sur nappe de Bruxelles Environnement. Il y a lieu de noter qu'aucune installation géothermique exploitant la nappe des sables du Bruxellien n'est à ce jour recensée en RBC.

Tableau 6 - Base de données des installations géothermiques en RBC (décembre 2023)

| Site                                 | Aquifère capté | Débit max (m³/h) | ΔT max (°C) | Nombre de paires de puits (ATES) | Distance min entre puits du même cluster (m) | Distance min entre puits chaud et froid (m) | Débits par puits (m³/h) | Profondeur (m) | Puissance nominale PAC (kW) | Puissance calorifique max (kW) | Puissance frigorifique max (kW) | Besoins chaud annuels (kWh/an) | Besoins froid annuels (kWh/an) |
|--------------------------------------|----------------|------------------|-------------|----------------------------------|--|---|-------------------------|----------------|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Bruxelles Environnement              | Landénien      | 48               | 8           | 4                                | 12   | 79  | 12                      | 87             | 265                         | -                              | -                               | -                              | -                              |
| Herman Teirlinck                     | Landénien      | -                | 10          | 4                                | 12   | 80  | -                       | 85             | -                           | 600                            | 482                             | 750000                         | 670000                         |
| Van Volkem                           | Landénien      | -                | -           | -                                | -  | -   | -                       | 60             | 150                         | -                              | -                               | -                              | -                              |
| Key West                             | Landénien      | 80               | 10          | 5                                | 20   | 50  | 16                      | -              | 580                         | 400                            | 650                             | 1824000                        | 775000                         |
| Mobilis                              | Landénien      | 75               | 10          | 5                                | 25   | 25  | 15                      | 60             | 450                         | -                              | -                               | -                              | -                              |
| Caserne pompiers                     | Landénien      | 20               | 9           | 2                                | 25   | 85  | 10                      | 56             | 145                         | 270                            | 150                             | 168000                         | 102000                         |
| WTC 1 / ZIN                          | Landénien      | 80               | 8           | 8                                | 20   | 50  | 10                      | 79             | 650                         | -                              | -                               | -                              | -                              |
| WTC 2 / LIVIN                        | Landénien      | 40               | 8           | 4                                | 20   | 50  | 10                      | 79             | -                           | 295                            | 375                             | 622000                         | 640000                         |
| Broccoli                             | Landénien      | -                | -           | 2                                | -  | -   | -                       | 52             | -                           | -                              | -                               | -                              | -                              |
| <b>Moyenne Landénien</b>             |                |                  |             | <b>19,1</b>                      | <b>59,9</b>                                  | <b>12,2</b>                                 |                         |                |                             |                                |                                 |                                |                                |
| Gare Maritime                        | Socle          | 130              | 11          | 5                                | 50   | 85  | 26                      | 160            | -                           | -                              | -                               | -                              | -                              |
| Serenitas                            | Socle          | 35               | 10          | 1                                | -  | 50  | 35                      | -              | 100                         | -                              | -                               | 103847                         | 79729                          |
| Isala                                | Socle          | 30               | ?           | 3                                | 20   | 42  | 10                      | 130            | 240                         | -                              | -                               | 724900                         | 548100                         |
| BroechevenSchool                     | Socle          | 42               | 9           | 2                                | -  | 80  | 21                      | 200            | 244                         | 195                            | 195                             | 180000                         | 204000                         |
| Projet Lebeau - Sablon               | Socle          | 149              | 11          | 3                                | 25   | 45  | 50                      | 250            | -                           | 1200                           | 1000                            | 168000                         | 102000                         |
| <b>Moyenne Socle</b>                 |                |                  |             | <b>31,7</b>                      | <b>60,4</b>                                  | <b>28,3</b>                                 |                         |                |                             |                                |                                 |                                |                                |
| <b>Moyenne Landénien &amp; Socle</b> |                |                  | <b>9,5</b>  |                                  |  |   |                         |                |                             |                                |                                 |                                |                                |



## 2.2.5 Modélisation d'un doublet type exploitant l'aquifère des sables du Landénien

### 2.2.5.1 Profil d'exploitation d'un doublet type

Sur la base des informations du chap.2.2.4.5, quatre informations fondamentales peuvent être synthétisées permettant de caractériser les propriétés théoriques d'un doublet « type » exploitant la nappe des sables du Landénien :

- le  $\Delta T$  entre pompage et réinjection ( $^{\circ}\text{C}$ ). Cette valeur est approchée indépendamment de la nappe exploitée,
- le débit de production de pointe par doublet ( $\text{m}^3/\text{h}/\text{doublet}$ ),
- la puissance géothermique de pointe par doublet tenant compte des deux valeurs précédentes ( $\text{kW}/\text{doublet}$ ),
- la distance minimale entre puits chaud et froid (m).

Tableau 7 - Propriétés théoriques d'un doublet « type » exploitant la nappe des sables du Landénien

| Paramètre  | Valeur |
|--|--------|
| $\Delta T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )  | 10     |
| Débit de production de pointe par doublet ( $\text{m}^3/\text{h}/\text{doublet}$ ) | 12.2   |
| Puissance géothermique de pointe par doublet ( $\text{kW}/\text{doublet}$ )        | 142    |
| Distance minimale entre puits chaud et froid (m)                                   | 60     |

Le tableau ci-dessous reprend, pour un doublet type exploitant la nappe des sables du Landénien, le bilan d'exploitation mensuel sur une année complète du point de vue :

- des débits d'exploitation de nappe moyens et maximaux (paramètres *Monthly flowrate* et *Maximum flowrate* exprimés en  $\text{m}^3/\text{h}$ ),
- des puissances géothermiques moyennes et maximales déployées (paramètres *P ground monthly* et *P ground max* exprimés en kW),
- de la production géothermique (paramètre *E ground monthly* exprimé en kWh).

Ce bilan est obtenu par application des coefficients (coef / *P ground max*) synthétisés au chap.2.2.4.4 sur les propriétés théoriques du doublet type.



Tableau 8 - Bilan d'exploitation mensuel sur une année complète (Landénien)

| Month                          | Monthly flowrate (m <sup>3</sup> /h) | Maximum flowrate (m <sup>3</sup> /h) | P ground monthly (kW) | P ground max (kW) | E ground monthly (kWh/month) |
|--------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|-------------------|------------------------------|
| 1                              | 2,3                                  | 5,7                                  | 26,8                  | 66,1              | 21.506                       |
| 2                              | 2,0                                  | 5,1                                  | 23,5                  | 59,4              | 17.238                       |
| 3                              | 1,5                                  | 4,0                                  | 17,7                  | 46,1              | 14.265                       |
| 4                              | 0,7                                  | 3,5                                  | 8,3                   | 40,6              | 6.979                        |
| 5                              | -0,4                                 | -7,8                                 | -4,8                  | -90,4             | -5.741                       |
| 6                              | -2,7                                 | -12,2                                | -31,9                 | -141,9            | -26.381                      |
| 7                              | -3,6                                 | -12,2                                | -41,7                 | -141,6            | -34.453                      |
| 8                              | -2,8                                 | -12,1                                | -33,0                 | -140,5            | -27.921                      |
| 9                              | -0,9                                 | -11,8                                | -10,1                 | -137,3            | -10.572                      |
| 10                             | 0,6                                  | 4,3                                  | 7,3                   | 50,5              | 6.673                        |
| 11                             | 1,6                                  | 4,6                                  | 19,0                  | 54,1              | 15.013                       |
| 12                             | 2,1                                  | 6,1                                  | 24,1                  | 70,6              | 2.441                        |
| Balance (kWh)                  |                                      |                                      |                       |                   | -20.953                      |
| Total Energy (kWh)             |                                      |                                      |                       |                   | 189.181                      |
| Total Energy for heating (kWh) |                                      |                                      |                       |                   | 84.114                       |
| Total Energy for cooling (kWh) |                                      |                                      |                       |                   | 105.067                      |

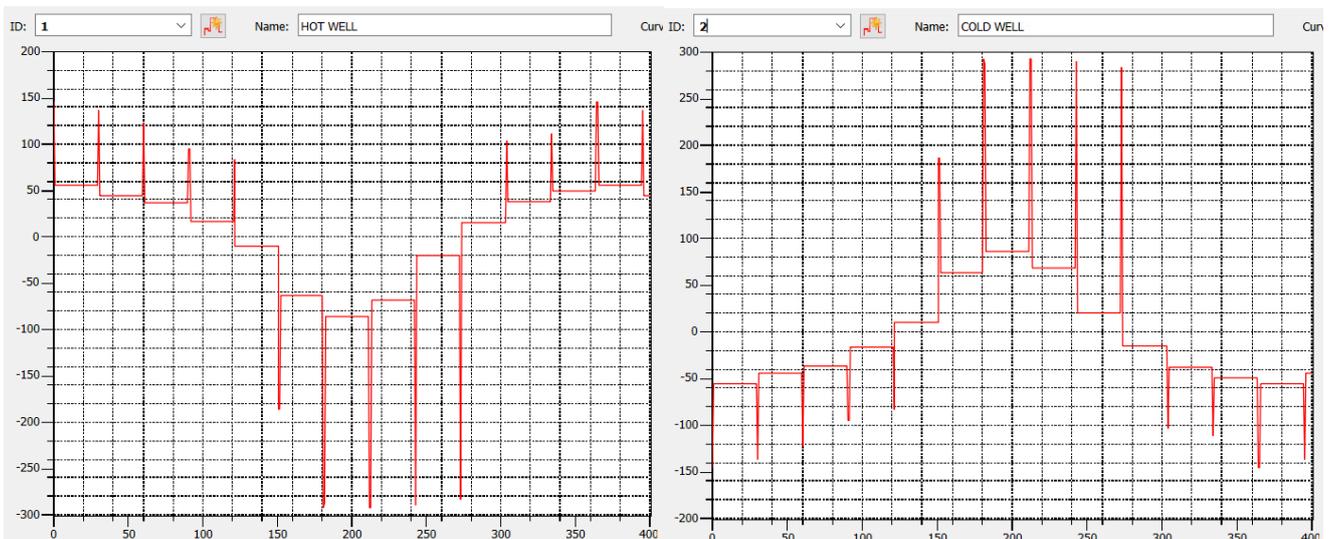
Vis-à-vis des simulations FEFLOW réalisées sur le doublet type, nous émettons les hypothèses ci-dessous :

- exploitation à puissance/débit moyen mensuel par défaut ;
- à la fin de chaque mois, exploitation à puissance/débit maximum observé sur le mois durant 24h.

Ceci va permettre d'optimiser le temps de calcul sur 30 ans tout assurant une approche conservative vis-à-vis des simulations générées du fait de la génération d'un pic d'exploitation de 24 h à puissance/débit maximum à la fin de chaque mois.

Les figures ci-dessous reprennent les chroniques de débit d'exploitation sur une année tels qu'appliqués au logiciel FEFLOW pour le doublet type Landénien (exprimés en m<sup>3</sup>/jour). Les valeurs appliquées au puits froid sont fatalement l'inverse des valeurs appliquées au puits chaud :

Figure 11 - Chroniques de débit d'exploitation sur une année tels qu'appliqués au logiciel FEFLOW pour le doublet type Landénien (exprimés en m<sup>3</sup>/jour)



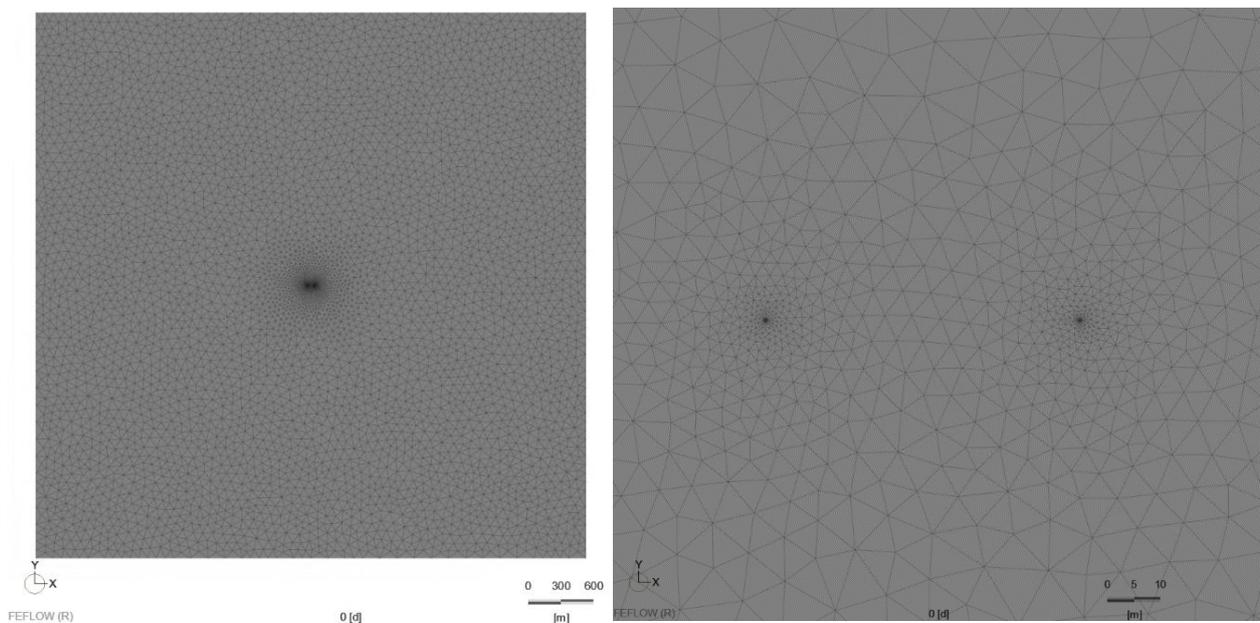
## .2.2.5.2 Maillage en éléments finis

Le tableau ci-dessous reprend les paramètres du maillage en éléments finis appliqué au modèle :

Tableau 9 - Paramètres du maillage en éléments finis appliqué au modèle (Landénien)

| Paramètres                              | Valeurs  |
|---|--|
| Longueur domaine                        | 5000 m   |
| Largeur domaine                         | 5000 m   |
| Type maillage                           | Eléments finis   |
| Nombre éléments                         | 11008  |
| Nombre nœuds                            | 5599   |
| Distance entres puits chaud et froid    | 60 m<br>Selon données synthétisées au chap.2.2.4.5   |
| Orientation de l'implantation des puits | Implantation orientée selon un axe longitudinal Est-Ouest (perpendiculairement au sens d'écoulement de la nappe) |
| Raffinage maillage                      | Jusqu'à 0.1 m au droit des points d'implantation du doublet.   |
| Nombre de couches                       | 1  |
| Mode                                    | Confined   |

Figure 12 - Maillage en éléments finis tel qu'appliqué au logiciel FEFLOW (Landénien)



### .2.2.5.3 Modèle géologique

Le tableau ci-dessous reprend les éléments ayant permis la construction de la structure 3D du modèle relatif à l'aquifère cible :

Tableau 10 - Eléments ayant permis la construction de la structure 3D du modèle relatif à l'aquifère cible (Landénien)

| Paramètre   | Valeur                              | Détails   |
|---|-------------------------------------|---|
| Toit du membre de Grandglise                            | Moyenne arithmétique = -18.91 m DNG | Selon données du modèle géologique <a href="#">BRUSTRATI3D v1.1</a>   |
| Epaisseur productive des membres de Grandglise + Lincet | 17.5 m                              | Résultat de diagraphie au micromoulinet réalisée au droit d'un puits test sur le site de Bruxelles Environnement présentant une productivité en exploitation estimée à 12 m <sup>3</sup> /h (proche de la productivité moyenne par puits estimée à 12.2 m <sup>3</sup> /h pour le Landénien, selon données synthétisées au chap.2.2.4.5)<br><br>Rapport d'étude <i>Evaluatie van de haalbaarheid op basis van een putproef</i> , IFTECH, 2010 |

### .2.2.5.4 Conditions aux limites

Le tableau ci-dessous reprend les conditions aux limites appliquées au modèle :

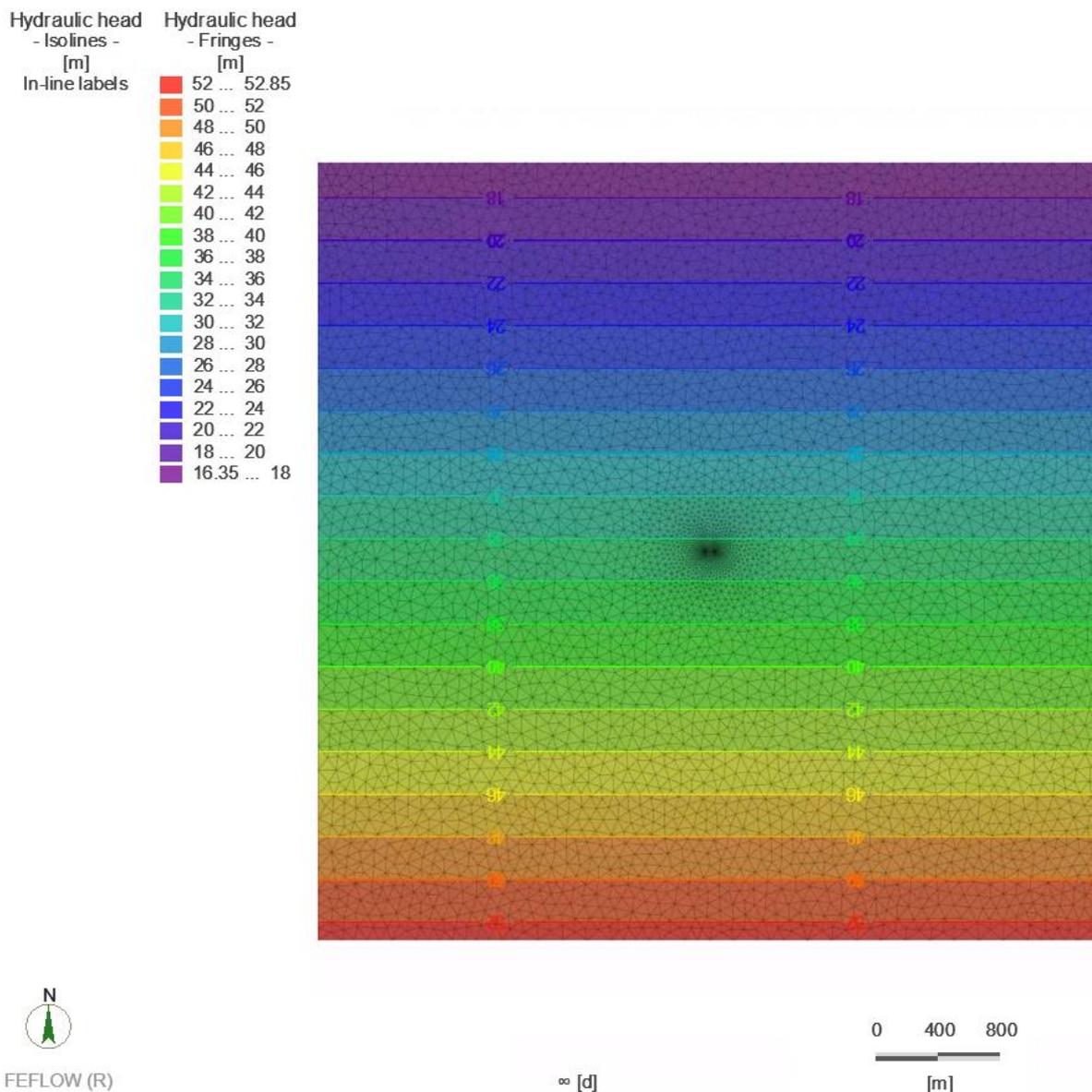
Tableau 11 - Conditions aux limites appliquées au modèle (Landénien)

| Limite                | Condition                                   | Détails  |
|-----------------------|---|--|
| Sud (amont)           | Potentiel imposé = +52.85 m DNG (Dirichlet) | Selon piézométrie de mai 2013 <a href="#">HYDROLAND</a> <ul style="list-style-type: none"><li>• Piézométrie statique moy. estimée à + 34.6 m DNG</li><li>• Gradient hydraulique moy. estimé à 0.73 %</li></ul> |
| Nord (aval)           | Potentiel imposé = +16.35 m DNG (Dirichlet) |  |
| Bordures Est et Ouest | Flux imposé = 0 (Neumann)                   | Limites à flux nul   |



La figure ci-dessous reprend la piézométrie statique telle que modélisée sur FEFLOW après application des conditions aux limites :

Figure 13 - Piézométrie statique telle que modélisée sur FEFLOW après application des conditions aux limites (Landénien)



## .2.2.5.5 Propriétés du sous-sol

### .2.2.5.5.1 Propriétés hydrodynamiques et hydrodispersives

Le tableau ci-dessous reprend la synthèse des propriétés hydrodynamiques et hydrodispersives appliquées au modèle :

Tableau 12 - Synthèse des propriétés hydrodynamiques et hydrodispersives (Landénien)

| Paramètre                               | Valeur  | Détails  |
|---|---|--|
| Conductivité hydraulique                | $K_h = 1.5E-5$ m/s<br>Pour les conductivités hydrauliques verticales ( $K_v$ ) ont émet l'hypothèse suivante : $K_v = K_h/10$ | Calibration en régime transitoire sur base du pompage d'essai documenté dans le Rapport d'étude <i>Evaluatie van de haalbaarheid op basis van een putproef, IFTECH, 2010</i><br>Voir chap .2.2.5.6 |
| Coefficient d'emmagasinement spécifique | $1E-5$ m-1  | Littérature :<br>Freeze and Cherry (1979) / Carter and Bentley (1991)  |
| Porosité efficace                       | 20%   | Littérature :<br>Johnson (1967) / Kresic (2007)  |
| Dispersivité longitudinale              | 5 m   | Littérature :<br>Gelhar, et al. (1992) / Freeze and Cherry (1979) / Marsily (1986)   |
| Dispersivité transversale               | 0.5 m   | Littérature :<br>Gelhar, et al. (1992) / Freeze and Cherry (1979) / Marsily (1986)   |

### .2.2.5.5.2 Propriétés thermiques

Le tableau ci-dessous reprend la synthèse des propriétés thermiques appliquées au modèle :

Tableau 13 - Synthèse des propriétés thermiques (Landénien)

| Paramètre                                     | Valeur                    | Détails  |
|---|---------------------------|--|
| Température                                   | 14.5 °C                   | Valeur de référence estimée selon données <a href="#">BRUWATER</a>   |
| Capacité calorifique vol. eau sout.           | 4.15 MJ/m <sup>3</sup> /K | NIT 259 (BuildWise)  |
| Conductivité thermique eau sout.              | 0.59 W/m/K                | NIT 259 (BuildWise)  |
| Capacité calorifique vol. sables du Landénien | 2.5 MJ/m <sup>3</sup> /K  | NIT 259 (BuildWise)<br><br>Valeur représentative du membre de Grandglise, constituant la majeure partie de l'aquifère des sables du Landénien                        |
| Conductivité thermique sables du Landénien    | 2.05 W/m/K                | Selon <a href="#">Gerard P et al. 2020</a><br><br>Valeur représentative du membre de Grandglise, constituant la majeure partie de l'aquifère des sables du Landénien |



## .2.2.5.6 Calibration

La calibration du modèle numérique est réalisée en régime transitoire et consiste à reproduire numériquement la courbe de descente observée lors d'un pompage d'essai ayant été réalisé au droit d'un puits test foré dans le cadre de l'étude de faisabilité du système géothermique implémenté sur le bâtiment de Bruxelles Environnement (source : Rapport d'étude *Evaluatie van de haalbaarheid op basis van een putproef, IFTECH, 2010*).

En effet, les 4 doublets, actuellement en fonctionnement et exploitant la nappe des sables du Landénien, présentent une productivité d'exploitation estimée à 12 m<sup>3</sup>/h/doublet, très représentative donc de la productivité moyenne par puits estimée à 12.2 m<sup>3</sup>/h pour le Landénien (cf. chap .2.2.4.5). Autrement dit, la calibration du modèle sur cet essai permettrait d'assurer une bonne représentativité vis-à-vis des propriétés hydrodynamiques « moyennes » théoriques de l'aquifère des sables du Landénien en RBC.

La calibration se focalise essentiellement sur l'ajustement du paramètre « conductivité hydraulique ».

Le tableau ci-dessous reprend les paramètres de l'essai ainsi que les résultats de simulation :

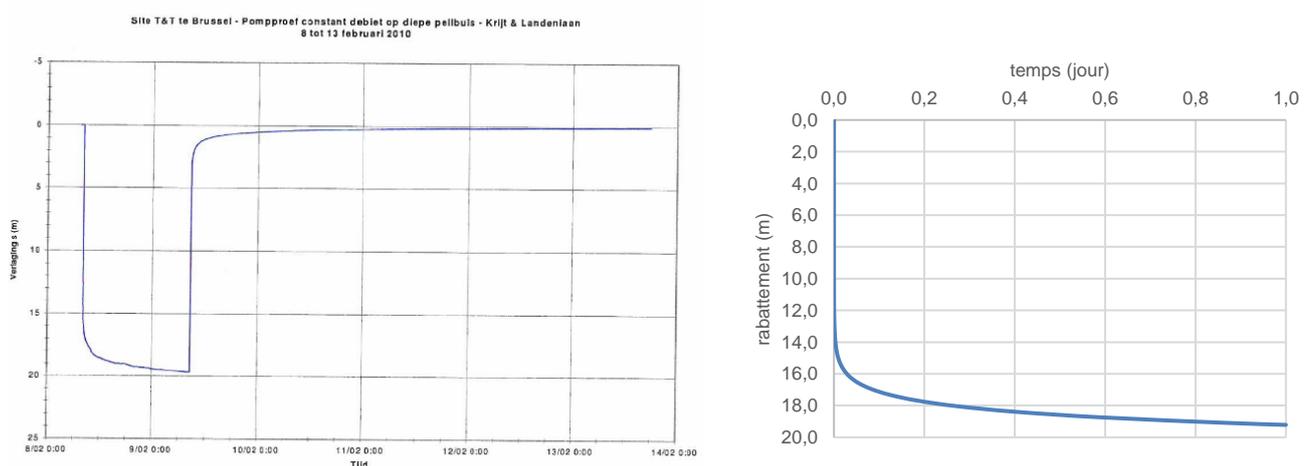
Tableau 14 - Calibration / Paramètres de l'essai et résultats de simulation (Landénien)

| Paramètre              | Valeur                  |
|------------------------|-------------------------|
| Débit essai            | 10.77 m <sup>3</sup> /h |
| Durée                  | 24 h                    |
| Rabatement max observé | 19.7 m                  |
| Rabatement max simulé  | 19.22 m                 |

Tenant compte des pertes de charge quadratiques induites sur le puits test et non quantifiées par FEFLOW, le modèle peut être considéré calibré.

Les figures ci-dessous reprennent les courbes piézométriques telles qu'observées lors du pompage d'essai et simulée sur FEFLOW :

Figure 14 – Courbes piézométriques telle qu'observée lors du pompage d'essai (gauche) et telle que simulée sur FEFLOW (droite)



### .2.2.5.7 Simulations

Pour rappel, l'emprise du gîte géothermique est définie comme l' « aire (m<sup>2</sup>) d'exploitation géothermique ». Ce concept fait l'hypothèse que chaque installation géothermique a une zone d'exploitation au-delà de laquelle les impacts environnementaux en terme de piézométrie et température du sous-sol doivent respecter une valeur maximale admissible. En outre, le respect de « non superposition des emprises » doit théoriquement permettre d'assurer l'absence de conflit d'usage entre installations voisines.

Après l'implémentation de l'ensemble des données précédemment synthétisées, deux simulations ont pu être réalisées afin de déterminer l'emprise du gîte géothermique relative au doublet type Landénien :

- Simulation hydrodynamique en régime permanent à débit/puissance maximale, soit 12.2 m<sup>3</sup>/h / 142 kW. Cette première simulation permet de quantifier l'emprise du gîte géothermique (m<sup>2</sup>) vis-à-vis des impacts piézométriques maximums  $\Delta_h$ . Au-delà de cette emprise, l'impact piézométrique sur la nappe exploitée respecte la valeur maximale de +/- 2.0 m par rapport au niveau statique initial (soit l'ordre de grandeur de l'amplitude piézométrique observée sur la période 2010-2023 pour l'ensemble des nappes captives – cf .2.2.4.2.),
- Simulation hydrodynamique et thermique en régime transitoire sur 30 ans selon le profil d'exploitation défini au chap.2.2.5.1. Cette seconde simulation permet de quantifier l'emprise du gîte géothermique (m<sup>2</sup>) vis-à-vis des impacts thermiques maximums  $\Delta_T$ . Au-delà de cette emprise, l'impact thermique sur la nappe exploitée respecte la valeur maximale de +/- 1.0 °C par rapport à la température initiale.



Les figures suivantes reprennent les résultats de simulation pour le doublet type Landénien :

Figure 15 – Impact piézométrique maximum ( $\Delta h$  exprimé en m) – Simulation en régime permanent à débit/puissance maximale, soit 12.2 m<sup>3</sup>/h / 142 kW – doublet type Landénien

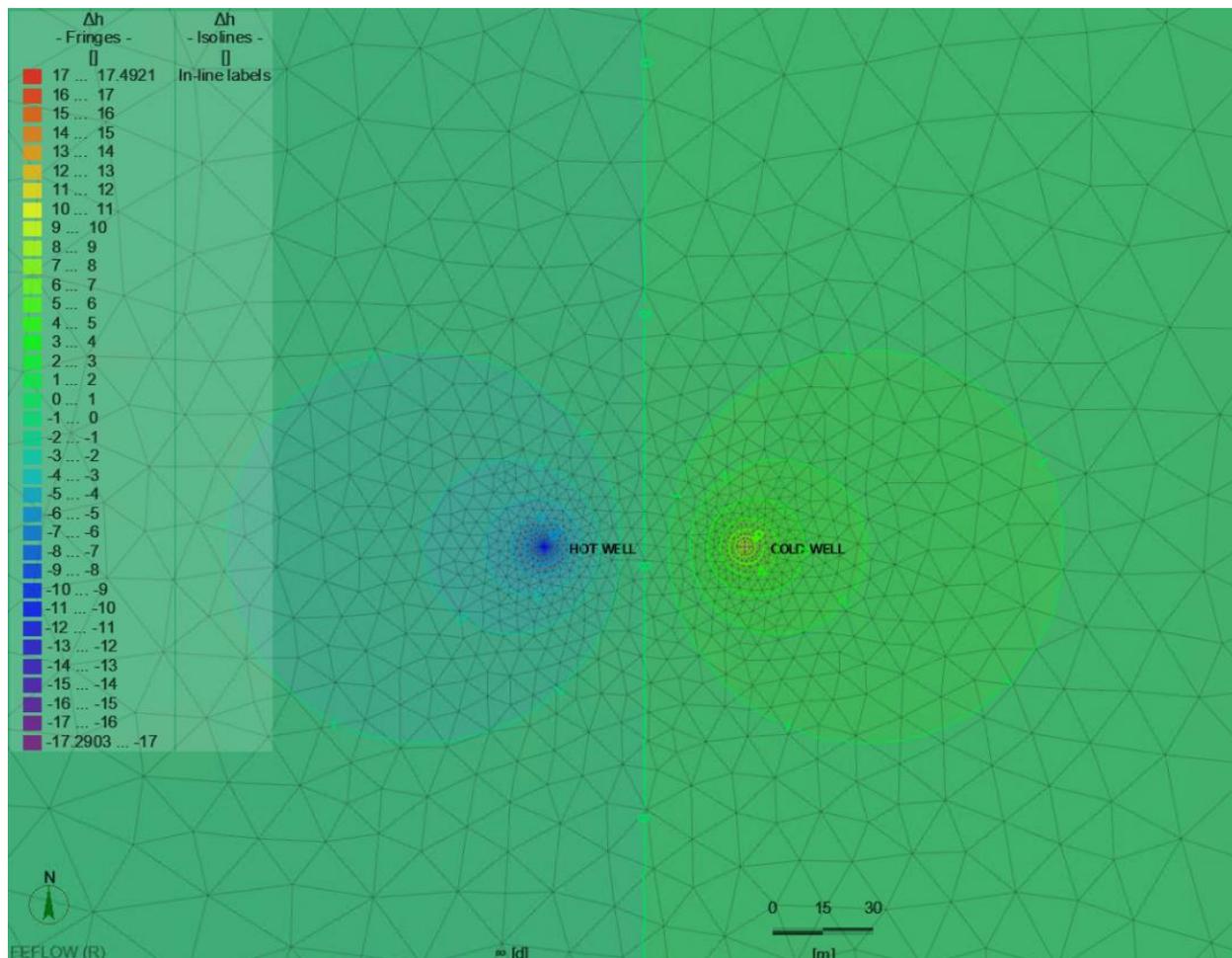


Figure 16 – Evolution de la piézométrie (m DNG) au droit des puits chaud et froid – Simulation en régime transitoire sur 30 ans – doublet type Landénien

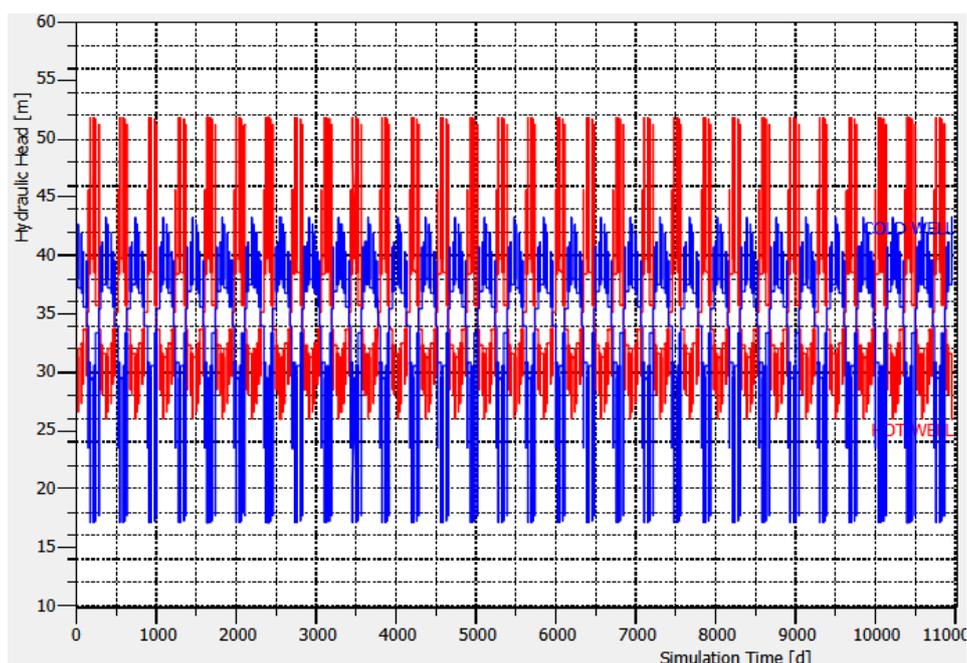


Figure 17 – Impact thermique maximum ( $\Delta T$  exprimé en  $^{\circ}\text{C}$ ) – Simulation en régime transitoire sur 30 ans – doublet type Landénien

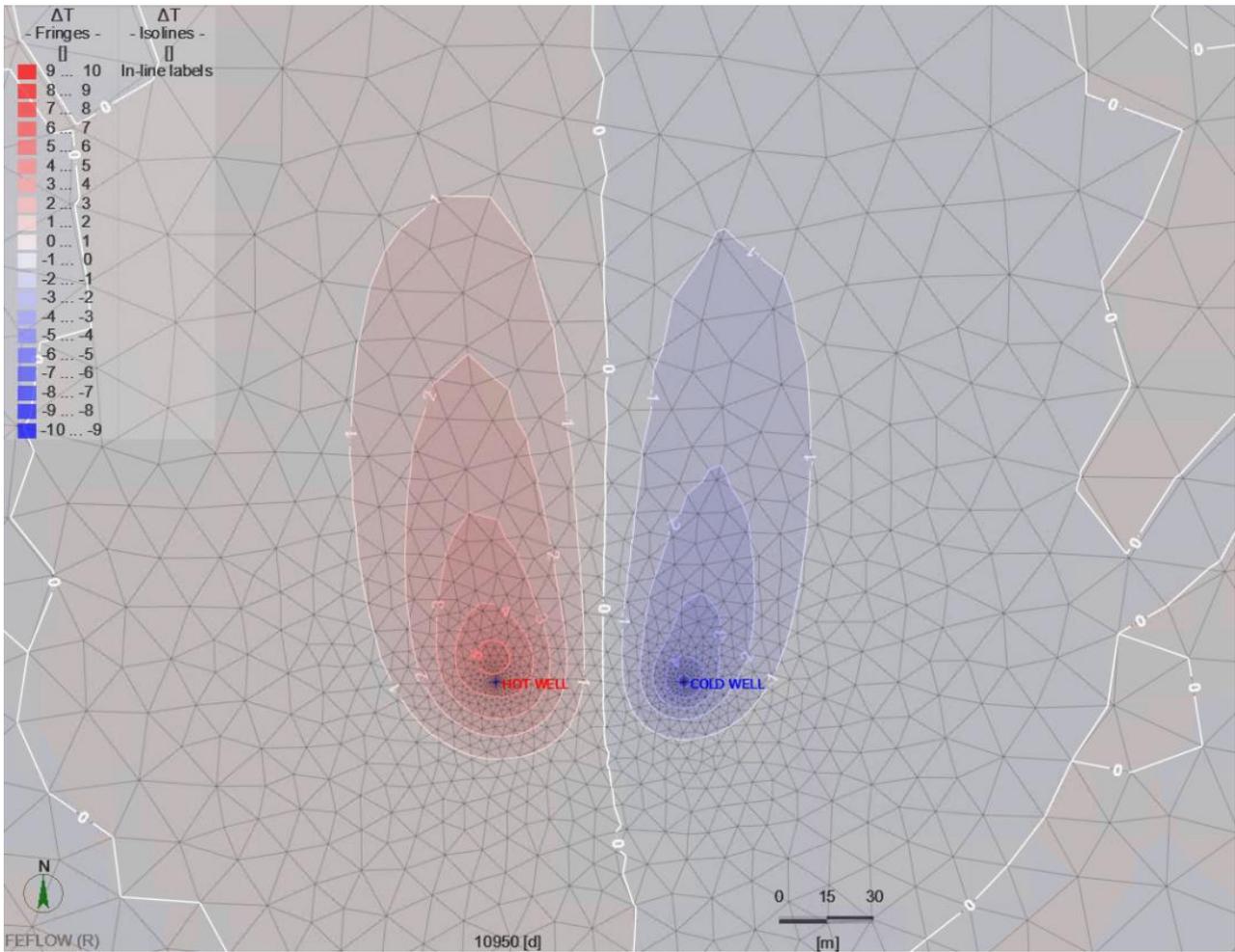
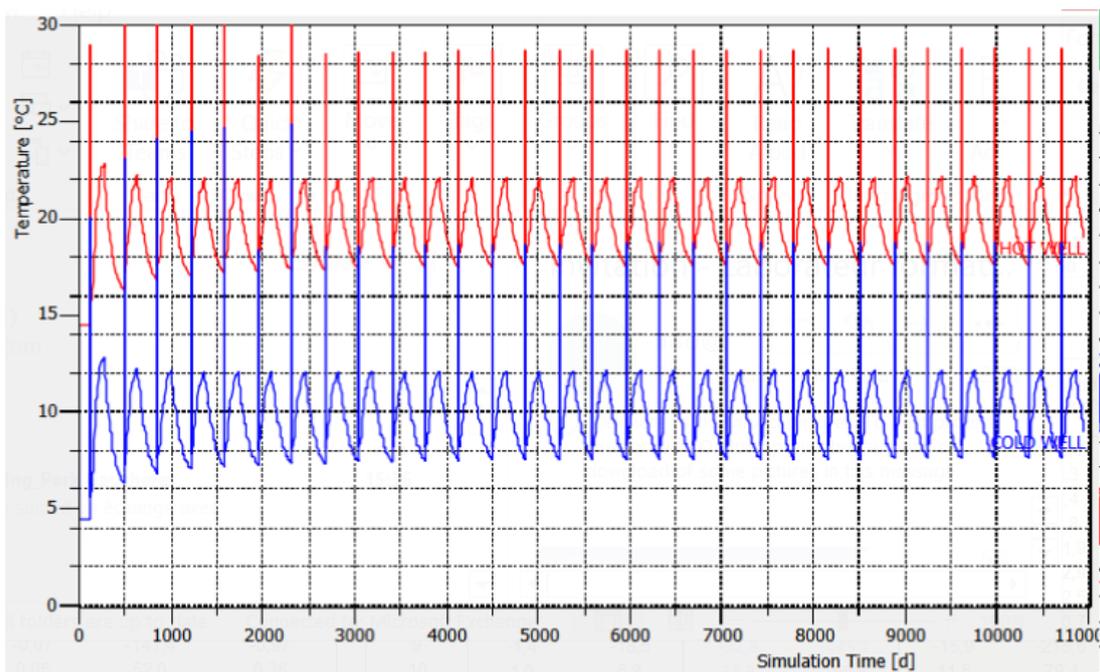
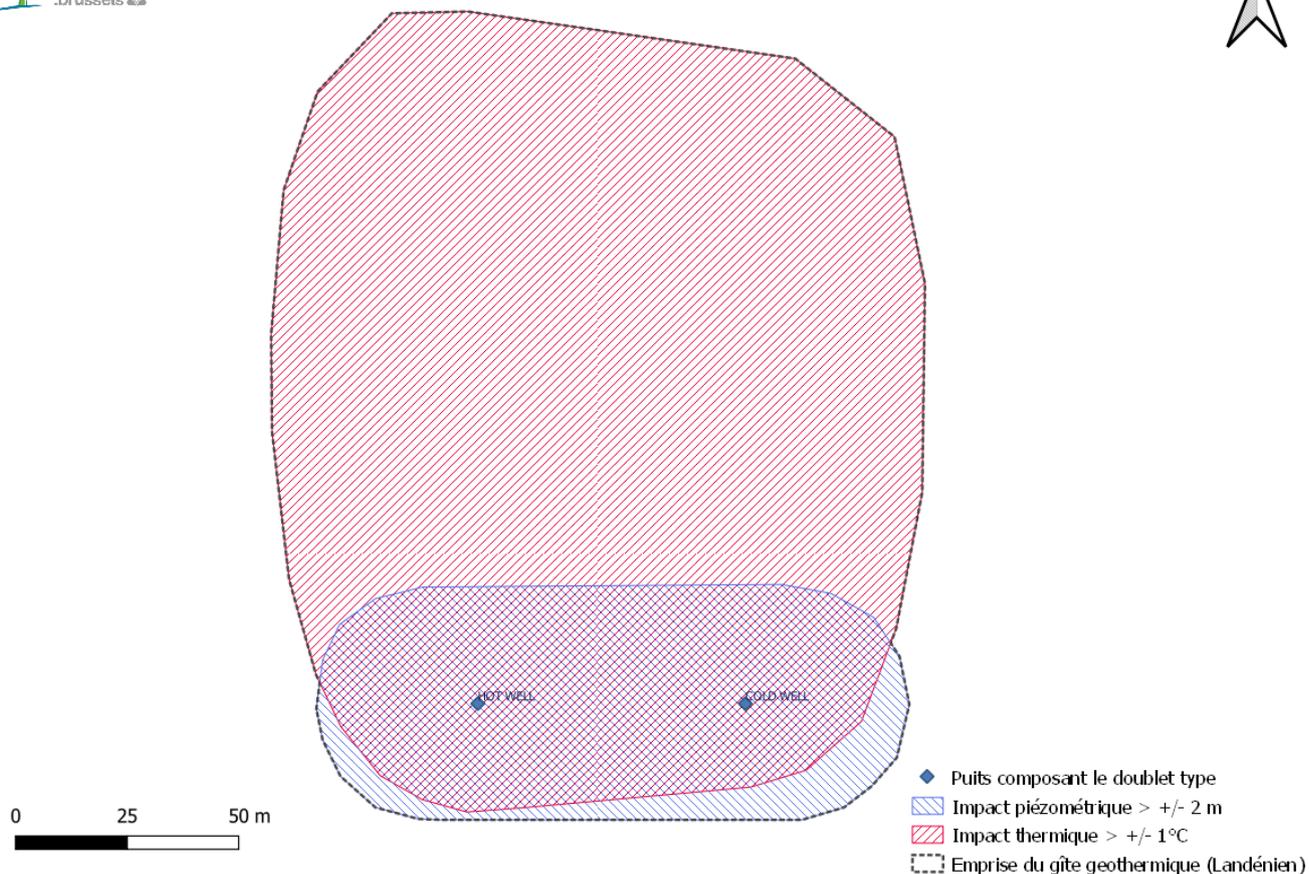


Figure 18 – Evolution de la température ( $^{\circ}\text{C}$ ) au droit des puits chaud et froid – Simulation en régime transitoire sur 30 ans – doublet type Landénien



La figure ci-dessous reprend l'emprise du gîte géothermique relative au doublet type Landénien :

Figure 19 – Emprise du gîte géothermique relative au doublet type Landénien



## 2.2.6 Modélisation d'un doublet type exploitant l'aquifère du Socle Paléozoïque

### 2.2.6.1 Profil d'exploitation d'un doublet type

Sur la base des informations du chap.2.2.4.5, quatre informations fondamentales peuvent être synthétisées permettant de caractériser les propriétés théoriques d'un doublet « type » exploitant la nappe du Socle Paléozoïque :

- le  $\Delta T$  entre pompage et réinjection ( $^{\circ}C$ ). Cette valeur est approchée indépendamment de la nappe exploitée,
- le débit de production de pointe par doublet ( $m^3/h/doublet$ ),
- la puissance géothermique de pointe par doublet tenant compte des deux valeurs précédentes ( $kW/doublet$ ),
- la distance minimale entre puits chaud et froid (m).

Tableau 15 – Propriétés théoriques d'un doublet « type » exploitant la nappe du Socle Paléozoïque

| Paramètre   | Valeur |
|---|--------|
| $\Delta T$ ( $^{\circ}C$ )                                    | 10     |
| Débit de production de pointe par doublet ( $m^3/h/doublet$ ) | 28.3   |
| Puissance géothermique de pointe par doublet ( $kW/doublet$ ) | 329    |
| Distance minimale entre puits chaud et froid (m)              | 60     |

Le tableau ci-dessous reprend, pour un doublet type exploitant la nappe du Socle Paléozoïque, le bilan d'exploitation mensuel sur une année complète du point de vue :

- des débits d'exploitation de nappe moyens et maximaux (paramètres *Monthly flowrate* et *Maximum flowrate* exprimés en  $m^3/h$ ),
- des puissances géothermiques moyennes et maximales déployées (paramètres *P ground monthly* et *P ground max* exprimés en  $kW$ ),
- de la production géothermique (paramètre *E ground monthly* exprimé en  $kWh$ ).

Ce bilan est obtenu par application des coefficients (coef / *P ground max*) synthétisés au chap.2.2.4.4 sur les propriétés théoriques du doublet type.



Tableau 16 – Bilan d'exploitation mensuel sur une année complète (Socle Paléozoïque)

| Month                          | Monthly flowrate (m³/h) | Maximum flowrate (m³/h) | P ground monthly (kW) | P ground max (kW) | E ground monthly (kWh/month) |
|--------------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------|------------------------------|
| 1                              | 5,3                     | 13,2                    | 62,1                  | 153,3             | 49.886                       |
| 2                              | 4,7                     | 11,8                    | 54,6                  | 137,7             | 39.987                       |
| 3                              | 3,5                     | 9,2                     | 41,0                  | 106,9             | 33.089                       |
| 4                              | 1,7                     | 8,1                     | 19,3                  | 94,1              | 16.190                       |
| 5                              | -1,0                    | -18,0                   | -11,1                 | -209,6            | -13.317                      |
| 6                              | -6,4                    | -28,3                   | -74,0                 | -329,1            | -61.195                      |
| 7                              | -8,3                    | -28,3                   | -96,8                 | -328,5            | -79.920                      |
| 8                              | -6,6                    | -28,0                   | -76,5                 | -325,9            | -64.767                      |
| 9                              | -2,0                    | -27,4                   | -23,4                 | -318,4            | -24.522                      |
| 10                             | 1,5                     | 10,1                    | 17,0                  | 117,2             | 15.479                       |
| 11                             | 3,8                     | 10,8                    | 44,2                  | 125,4             | 34.824                       |
| 12                             | 4,8                     | 14,1                    | 55,9                  | 163,7             | 5.661                        |
| Balance (kWh)                  |                         |                         |                       |                   | -48.605                      |
| Total Energy (kWh)             |                         |                         |                       |                   | 438.839                      |
| Total Energy for heating (kWh) |                         |                         |                       |                   | 195.117                      |
| Total Energy for cooling (kWh) |                         |                         |                       |                   | 243.722                      |

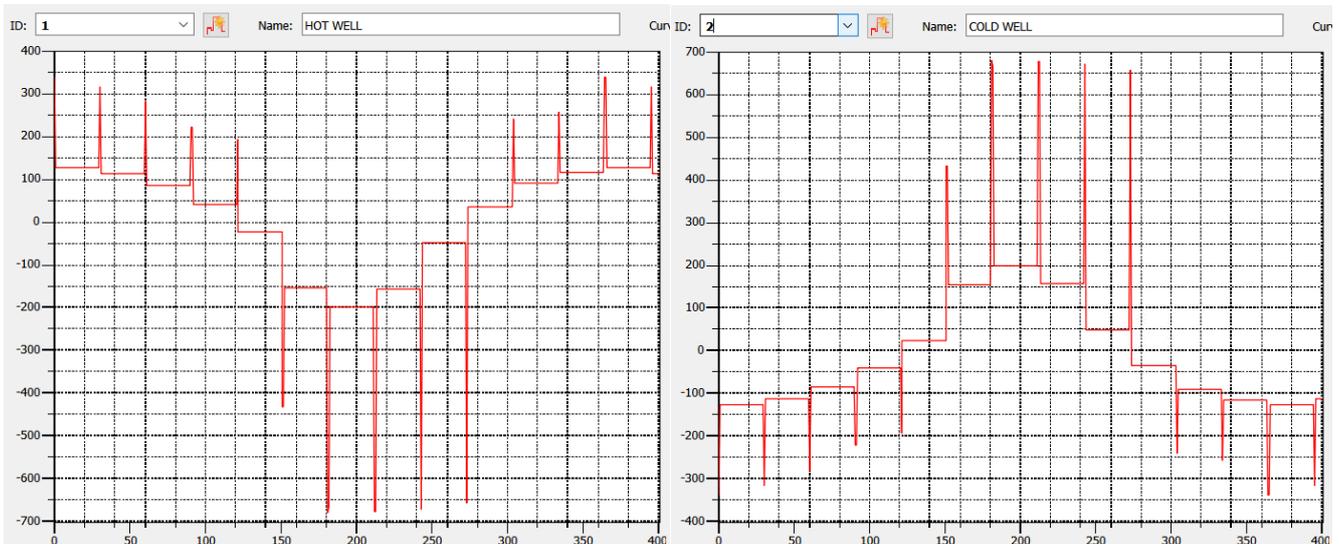
Vis-à-vis des simulations FEFLOW réalisées sur le doublet type, nous émettons les hypothèses ci-dessous :

- exploitation à puissance/débit moyen mensuel par défaut ;
- à la fin de chaque mois, exploitation à puissance/débit maximum observé sur le mois durant 24h.

Ceci va permettre d'optimiser le temps de calcul sur 30 ans tout assurant une approche conservative vis-à-vis des simulations générées du fait de la génération d'un pic d'exploitation de 24 h à puissance/débit maximum à la fin de chaque mois.

Les figures ci-dessous reprennent les chroniques de débit d'exploitation sur une année tels qu'appliqués au logiciel FEFLOW pour le doublet type Socle Paléozoïque (exprimés en m³/jour). Les valeurs appliquées au puits froid sont fatalement l'inverse des valeurs appliquées au puits chaud :

Figure 20 – Chroniques de débit d'exploitation sur une année tels qu'appliqués au logiciel FEFLOW pour le doublet type Socle (exprimés en m³/jour)



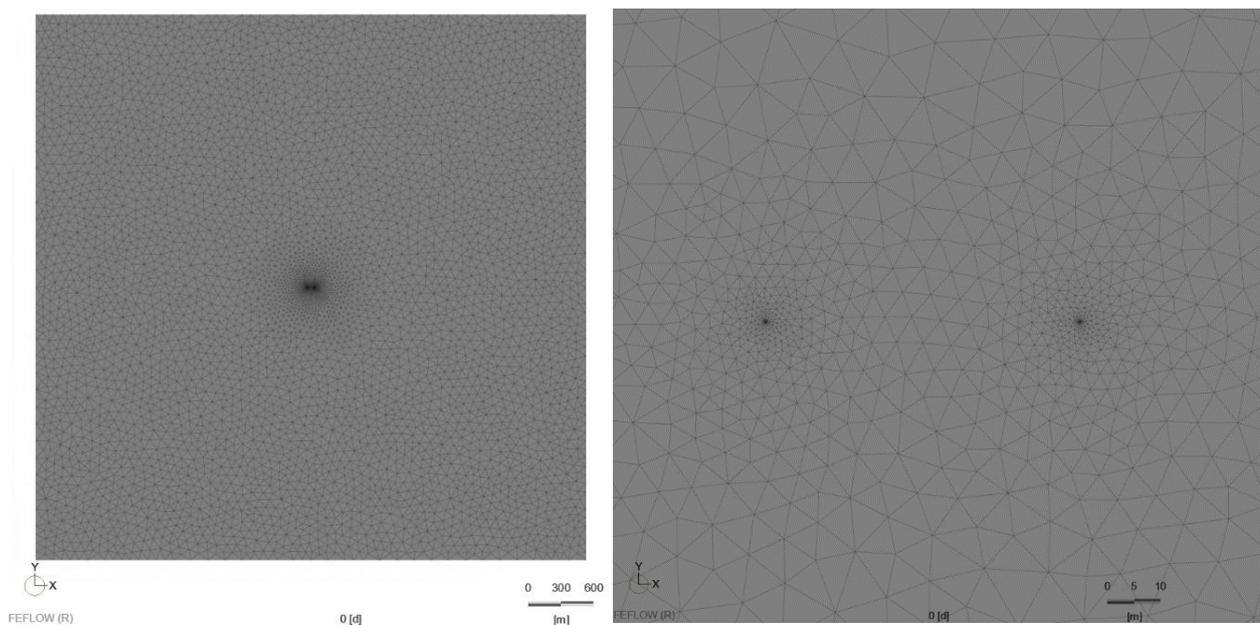
## .2.2.6.2 Maillage en éléments finis

Le tableau ci-dessous reprend les paramètres du maillage en éléments finis appliqué au modèle :

Tableau 17 – Paramètres du maillage en éléments finis appliqué au modèle (Socle Paléozoïque)

| Paramètres                              | Valeurs  |
|---|--|
| Longueur domaine                        | 5000 m   |
| Largeur domaine                         | 5000 m   |
| Type maillage                           | Eléments finis   |
| Nombre éléments                         | 11008  |
| Nombre nœuds                            | 5599   |
| Distance entres puits chaud et froid    | 60 m<br>Selon données synthétisées au chap.2.2.4.5   |
| Orientation de l'implantation des puits | Implantation orientée selon un axe longitudinal Est-Ouest (perpendiculairement au sens d'écoulement de la nappe) |
| Raffinage maillage                      | Jusqu'à 0.1 m au droit des points d'implantation du doublet.   |
| Nombre de couches                       | 1  |
| Mode                                    | Confined   |

Figure 21 – Maillage en éléments finis tel qu'appliqué au logiciel FEFLOW (Socle Paléozoïque)



### .2.2.6.3 Modèle géologique

Le tableau ci-dessous reprend les éléments ayant permis la construction de la structure 3D du modèle relatif à l'aquifère cible :

Tableau 18 – Eléments ayant permis la construction de la structure 3D du modèle relatif à l'aquifère cible (Socle Paléozoïque)

| Paramètre                                 | Valeur                              | Détails   |
|---|-------------------------------------|---|
| Toit du Socle Paléozoïque                 | Moyenne arithmétique = -51.19 m DNG | Selon données du modèle géologique <a href="#">BRUSTRATI3D v1.1</a>   |
| Epaisseur productive du Socle Paléozoïque | 22.0 m                              | Résultat de diagraphie au micromoulinet réalisée au droit du puits WW4 présentant une productivité en exploitation estimée à 30 m <sup>3</sup> /h (proche de la productivité moyenne par puits estimée à 28.3 m <sup>3</sup> /h pour le Socle, selon données synthétisées au chap.2.2.4.5).<br>Rapport d'étude 2019 04 01-MPOS-AGT1915-Rapport-v1, KWO Gare Maritime, Testen van KWO bronnen, AGT, 2019 |

### .2.2.6.4 Conditions aux limites

Le tableau ci-dessous reprend les conditions aux limites appliquées au modèle :

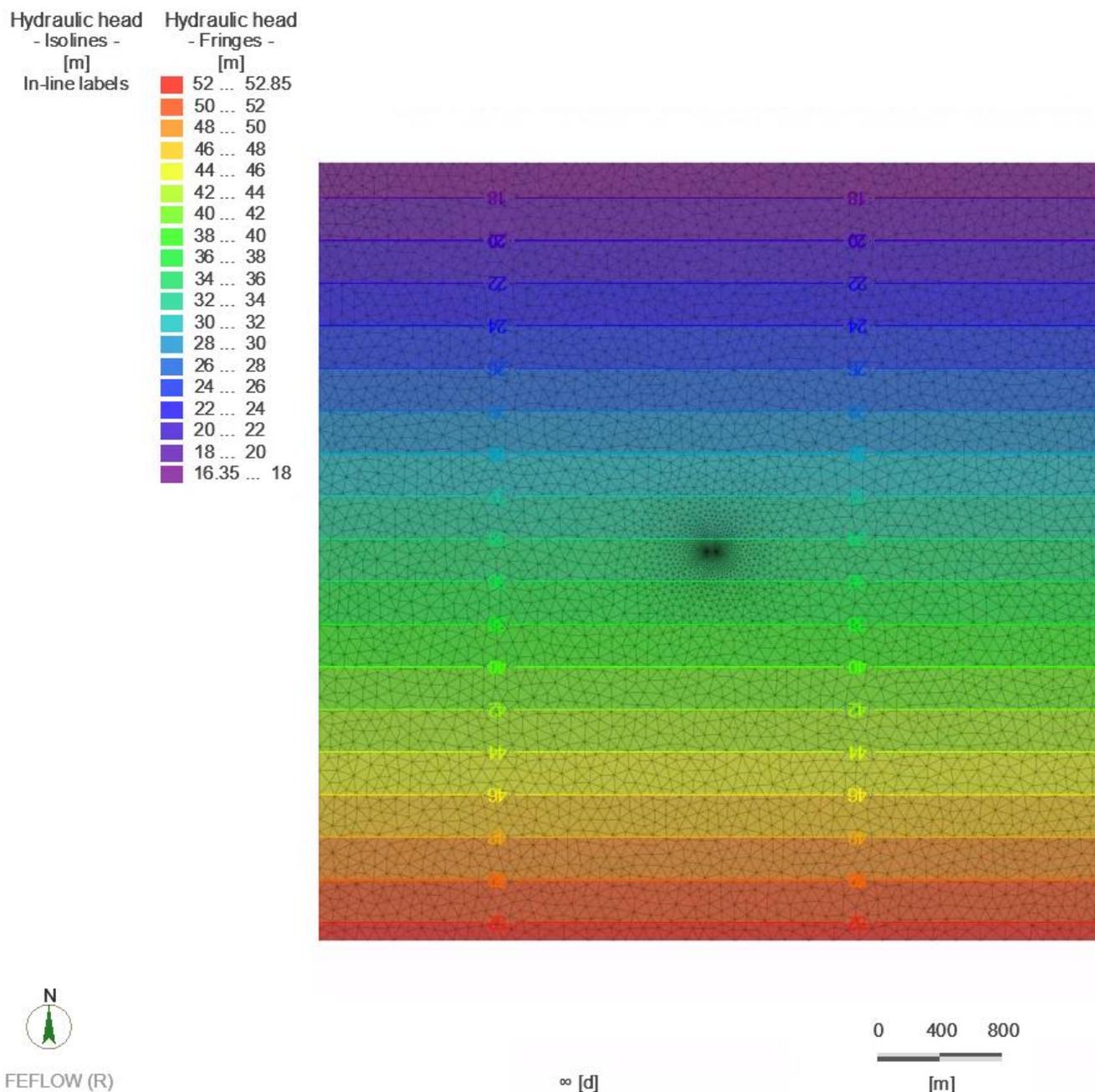
Tableau 19 – Conditions aux limites appliquées au modèle (Socle Paléozoïque)

| Limite                | Condition                                   | Détails  |
|-----------------------|---|--|
| Sud (amont)           | Potentiel imposé = +52.85 m DNG (Dirichlet) | Selon piézométrie de mai 2013 <a href="#">HYDROLAND</a>  |
| Nord (aval)           | Potentiel imposé = +16.35 m DNG (Dirichlet) | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Piézométrie statique moy. Estimée à + 34.6 m DNG</li> <li>• Gradient hydraulique moy. Estimé à 0.73 %</li> </ul> <p>En l'absence d'une carte piézométrique de référence pour le Socle, on émet l'hypothèse d'une piézométrie du Socle approchant la piézométrie du Landénien, que ce soit en terme de niveau statique que de gradient hydraulique régional. Selon les données piézométriques issues du monitoring régional (<a href="#">BRUWATER</a>), le delta piézométrique mesuré au droit de deux doublons piézométriques Landénien/Socle (piézomètres Coca Cola à Anderlecht – voir chap .2.2.4.2 et piézomètres Pz1/Pz2 en forêt de Soignes), avoisine 1 mètre. Cette observation permet de confirmer la pertinence de cette hypothèse simplificatrice.</p> |
| Bordures Est et Ouest | Flux imposé = 0 (Neumann)                   | Limites à flux nul   |



La figure ci-dessous reprend la piézométrie statique telle que modélisée sur FEFLOW après application des conditions aux limites :

Figure 22 – Piézométrie statique telle que modélisée sur FEFLOW après application des conditions aux limites (Socle Paléozoïque)



## .2.2.6.5 Propriétés du sous-sol

### .2.2.6.5.1 Propriétés hydrodynamiques et hydrodispersives

Le tableau ci-dessous reprend la synthèse des propriétés hydrodynamiques et hydrodispersives appliquées au modèle :

Tableau 20 – Synthèse des propriétés hydrodynamiques et hydrodispersives (Socle Paléozoïque)

| Paramètre                               | Valeur   | Détails   |
|---|--|---|
| Conductivités hydrauliques              | $K_h = 1.85E-5$ m/s<br><br>Pour les conductivités hydrauliques verticales ( $K_v$ ) ont émet l'hypothèse suivante : $K_v = K_h/10$ | Calibration en régime transitoire sur base du pompage d'essai réalisé au droit du puits WW4 présentant une productivité en exploitation estimée à 30 m <sup>3</sup> /h (proche de la productivité moyenne par puits estimée à 28.3 m <sup>3</sup> /h pour le Socle).<br>Rapport d'étude<br>2019 04 01-MPOS-AGT1915-Rapport-v1, KWO Gare Maritime, Testen van KWO bronnen, AGT, 2019 |
| Coefficient d'emmagasinement spécifique | 1E-5 m-1   | Littérature :<br>Freeze and Cherry (1979) / Carter and Bentley (1991)   |
| Porosité efficace                       | 20%  | Littérature :<br>Johnson (1967) / Kresic (2007)   |
| Dispersivité longitudinale              | 5 m  | Littérature :<br>Gelhar, et al. (1992) / Freeze and Cherry (1979) / Marsily (1986)  |
| Dispersivité transversale               | 0.5 m  | Littérature :<br>Gelhar, et al. (1992) / Freeze and Cherry (1979) / Marsily (1986)  |

### .2.2.6.5.2 Propriétés thermiques

Le tableau ci-dessous reprend la synthèse des propriétés thermiques appliquées au modèle :

Tableau 21 – Synthèse des propriétés thermiques (Socle Paléozoïque)

| Paramètre                                   | Valeur                    | Détails  |
|---|---------------------------|--|
| Température                                 | 14.5 °C                   | Valeur de référence estimée selon données <a href="#">BRUWATER</a> |
| Capacité calorifique vol. eau sout.         | 4.15 MJ/m <sup>3</sup> /K | NIT 259 (BuildWise)  |
| Conductivité thermique eau sout.            | 0.59 W/m/K                | NIT 259 (BuildWise)  |
| Capacité calorifique vol. Socle Paléozoïque | 2.2 MJ/m <sup>3</sup> /K  | NIT 259 (BuildWise)  |
| Conductivité thermique Socle Paléozoïque    | 2.95 W/m/K                | Selon <a href="#">Gerard P et al. 2020</a>                         |



## .2.2.6.6 Calibration

La calibration du modèle numérique est réalisée en régime transitoire et consiste à reproduire numériquement les courbes de descente observées lors d'un pompage d'essai ayant été réalisé au droit d'un puits test foré dans le cadre de l'étude de faisabilité du système géothermique implémenté sur le bâtiment de la Gare Maritime (source : Rapport d'étude 2019 04 01-MPOS-AGT1915-Rapport-v1, KWO Gare Maritime, Testen van KWO bronnen, AGT, 2019).

En effet, sur les 5 doublets, actuellement en fonctionnement et exploitant la nappe du Socle Paléozoïque avec des productivités d'exploitation variant de 10 à 60 m<sup>3</sup>/h/doublet, le puits WW4 présente une productivité d'exploitation estimée à 30 m<sup>3</sup>/h, très représentative donc de la productivité moyenne par puits estimée à 28.3 m<sup>3</sup>/h pour le Socle Paléozoïque (cf. chap.2.2.4.5). Autrement dit, la calibration du modèle sur cet essai permettrait d'assurer une bonne représentativité vis-à-vis des propriétés hydrodynamiques « moyennes » théoriques de l'aquifère du Socle Paléozoïque.

La calibration se focalise essentiellement sur l'ajustement du paramètre « conductivité hydraulique ».

Le tableau ci-dessous reprend les paramètres de l'essai ainsi que les résultats de simulation :

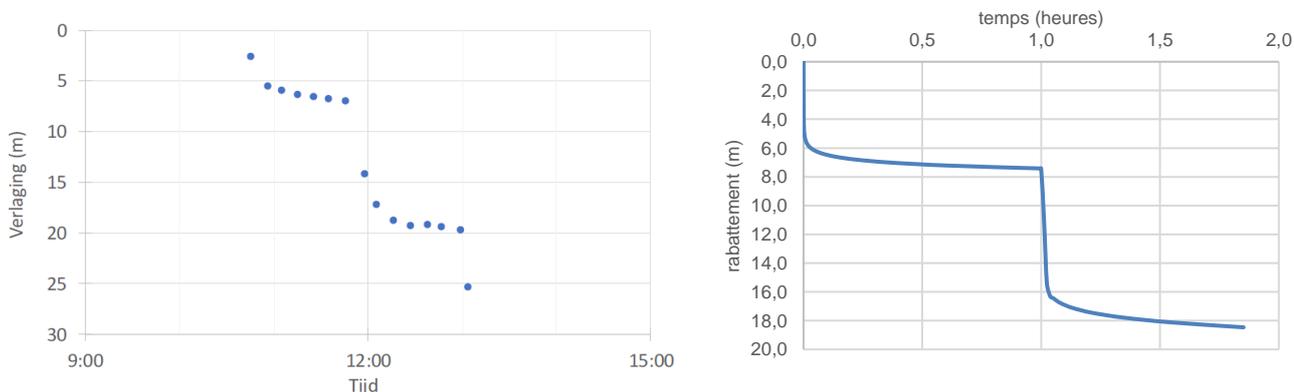
Tableau 22 – Calibration / Paramètres de l'essai et résultats de simulation (Socle Paléozoïque)

| Paramètre              | Valeur  |
|------------------------|---|
| Débit essai            | Palier 1 : 7.5 m <sup>3</sup> /h<br>Palier 2 : 18,5 m <sup>3</sup> /h |
| Durée                  | Palier 1 : 1 h<br>Palier 2 : 1 h                                      |
| Rabatement max observé | Palier 1 : 7.4 m<br>Palier 2 : 19.8 m                                 |
| Rabatement max simulé  | Palier 1 : 7.42 m<br>Palier 2 : 18.46 m                               |

Tenant compte des pertes de charge quadratiques induites sur le puits test et non quantifiées par FEFLOW, le modèle peut être considéré calibré.

Les figures ci-dessous reprennent les courbes piézométriques telles qu'observées lors du pompage d'essai et simulées sur FEFLOW :

Figure 23 – Courbes piézométriques telles qu'observées lors du pompage d'essai (gauche) et telle que simulées sur FEFLOW (droite)



### .2.2.6.7 Simulations

Pour rappel, l'emprise du gîte géothermique est définie comme l' « aire ( $m^2$ ) d'exploitation géothermique ». Ce concept fait l'hypothèse que chaque installation géothermique a une zone d'exploitation au-delà de laquelle les impacts environnementaux en terme de piézométrie et température du sous-sol doivent respecter une valeur maximale admissible. En outre, le respect de « non superposition des emprises » doit théoriquement permettre d'assurer l'absence de conflit d'usage entre installations voisines.

Après l'implémentation de l'ensemble des données précédemment synthétisées, deux simulations ont pu être réalisées afin de déterminer l'emprise du gîte géothermique relative au doublet type Socle Paléozoïque :

- Simulation hydrodynamique en régime permanent à débit/puissance maximale, soit  $28.3 \text{ m}^3/\text{h}$  /  $329 \text{ kW}$ . Cette première simulation permet de quantifier l'emprise du gîte géothermique ( $m^2$ ) vis-à-vis des impacts piézométriques maximums  $\Delta_h$ . Au-delà de cette emprise, l'impact piézométrique sur la nappe exploitée respecte la valeur maximale de  $\pm 2.0 \text{ m}$  par rapport au niveau statique initial (soit l'ordre de grandeur de l'amplitude piézométrique observée sur la période 2010-2023 pour l'ensemble des nappes captives – cf chap.2.2.4.2.),
- Simulation hydrodynamique et thermique en régime transitoire sur 30 ans selon le profil d'exploitation défini au chap .2.2.6.1. Cette seconde simulation permet de quantifier l'emprise du gîte géothermique ( $m^2$ ) vis-à-vis des impacts thermiques maximums  $\Delta_T$ . Au-delà de cette emprise, l'impact thermique sur la nappe exploitée respecte la valeur maximale de  $\pm 1.0 \text{ }^\circ\text{C}$  par rapport à la température initiale.



Les figures suivantes reprennent les résultats de simulation pour le doublet type Socle Paléozoïque :

Figure 24 – Impact piézométrique maximum ( $\Delta h$  exprimé en m) – Simulation en régime permanent à débit/puissance maximale, soit 28.3 m<sup>3</sup>/h / 329 kW – doublet type Socle Paléozoïque

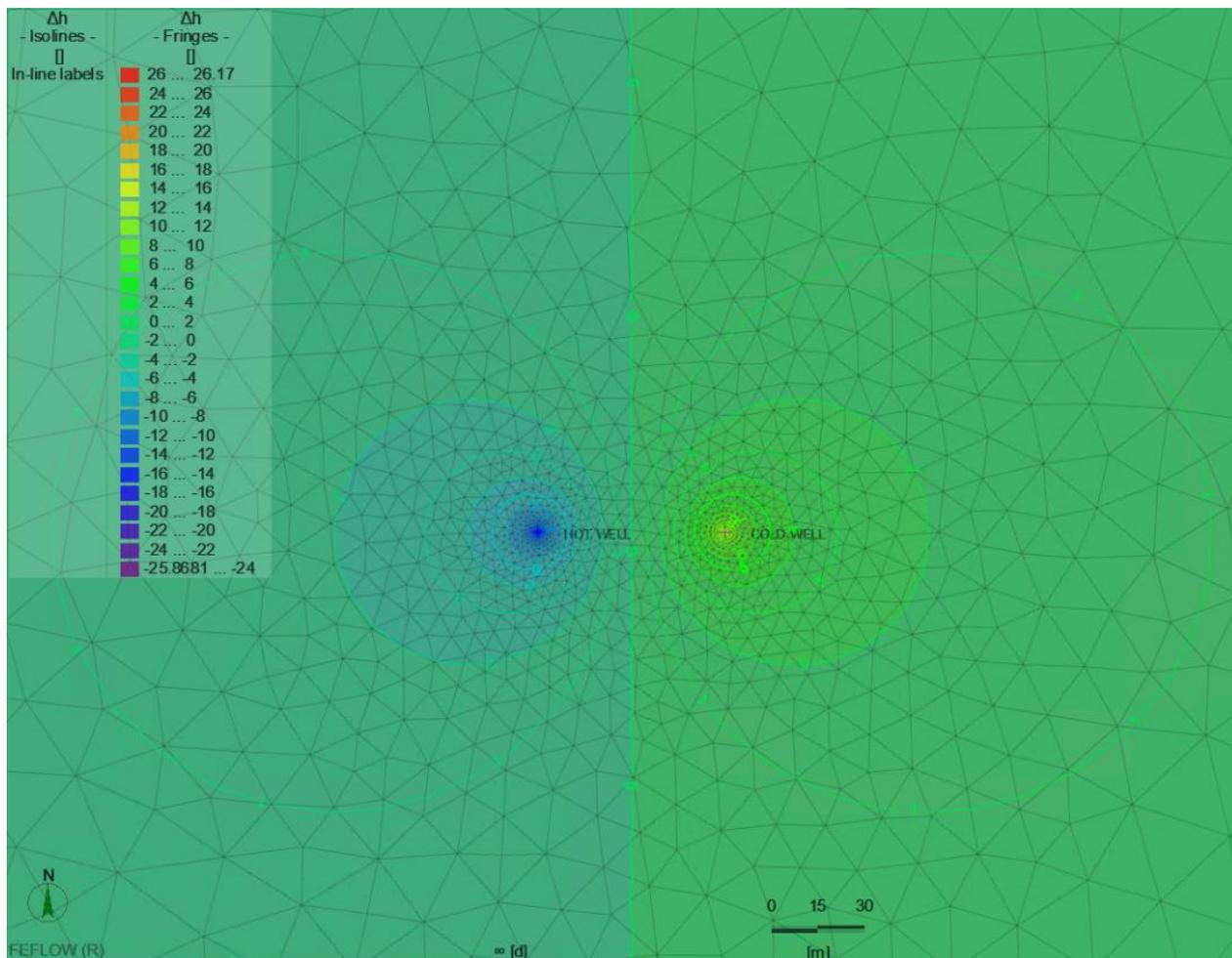


Figure 25 – Evolution de la piézométrie (m DNG) au droit des puits chaud et froid – Simulation en régime transitoire sur 30 ans – doublet type Socle Paléozoïque

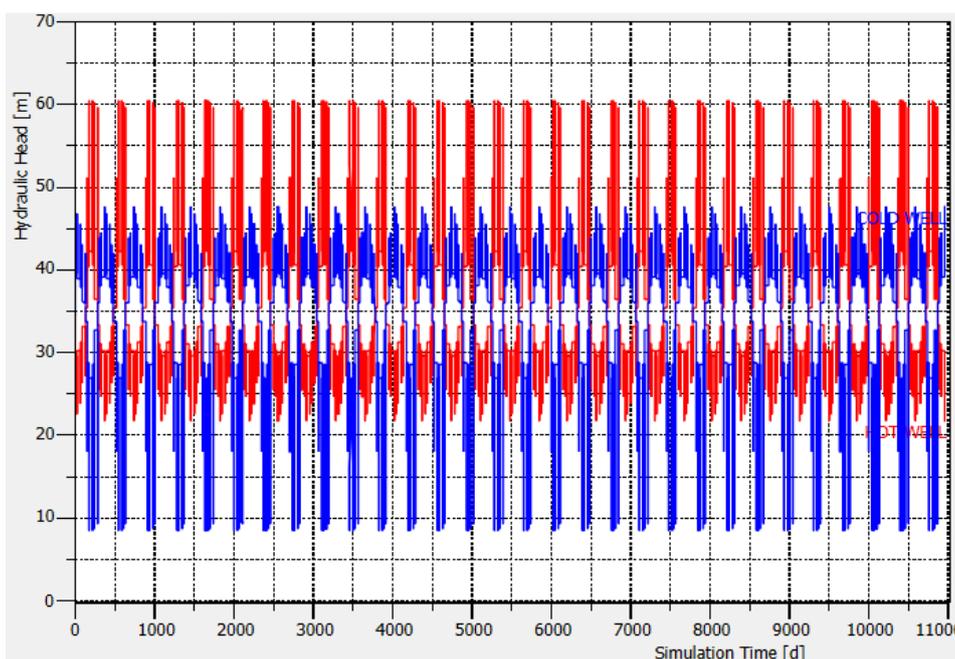


Figure 26 – Impact thermique maximum ( $\Delta T$  exprimé en °C) – Simulation en régime transitoire sur 30 ans – doublet type Socle Paléozoïque

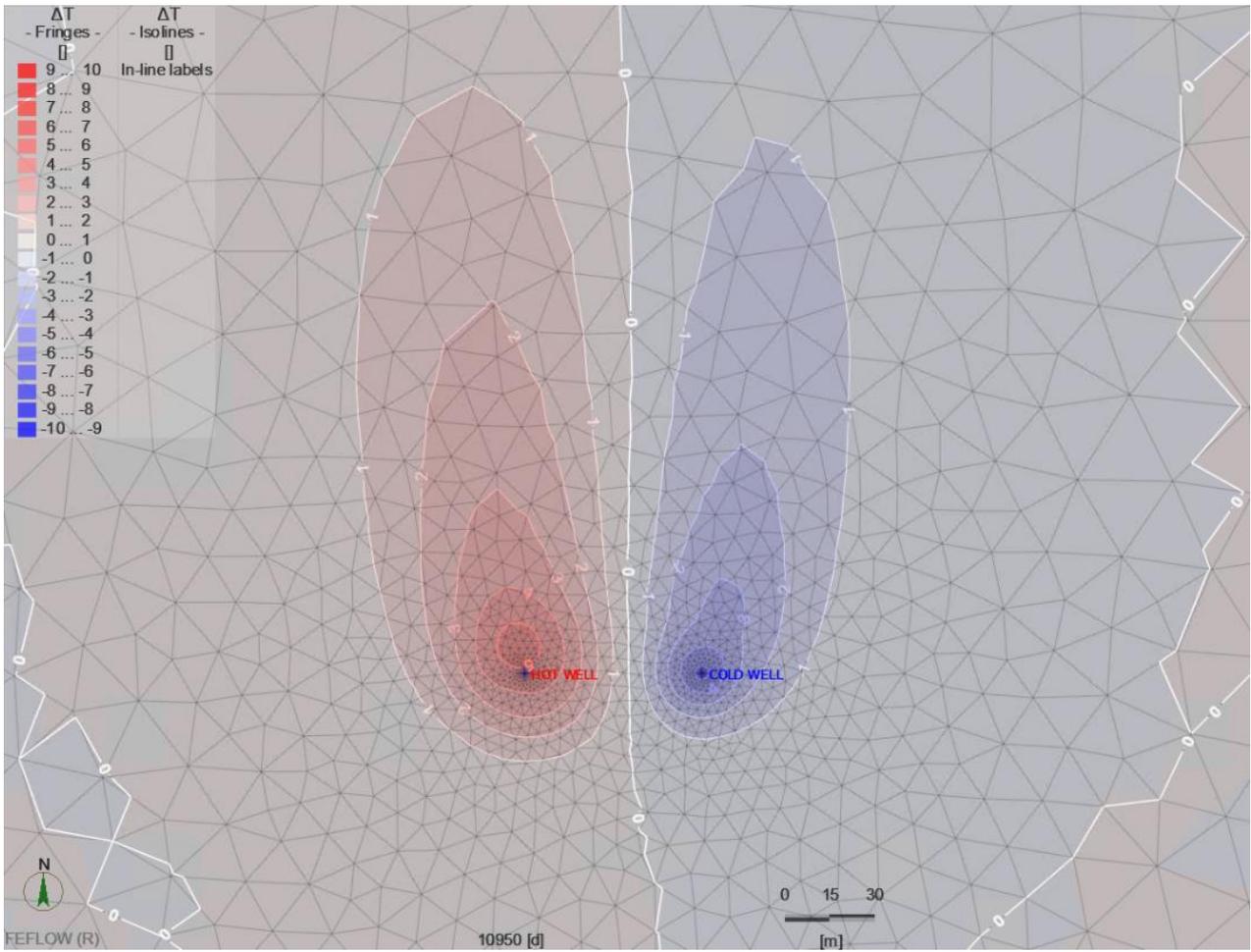
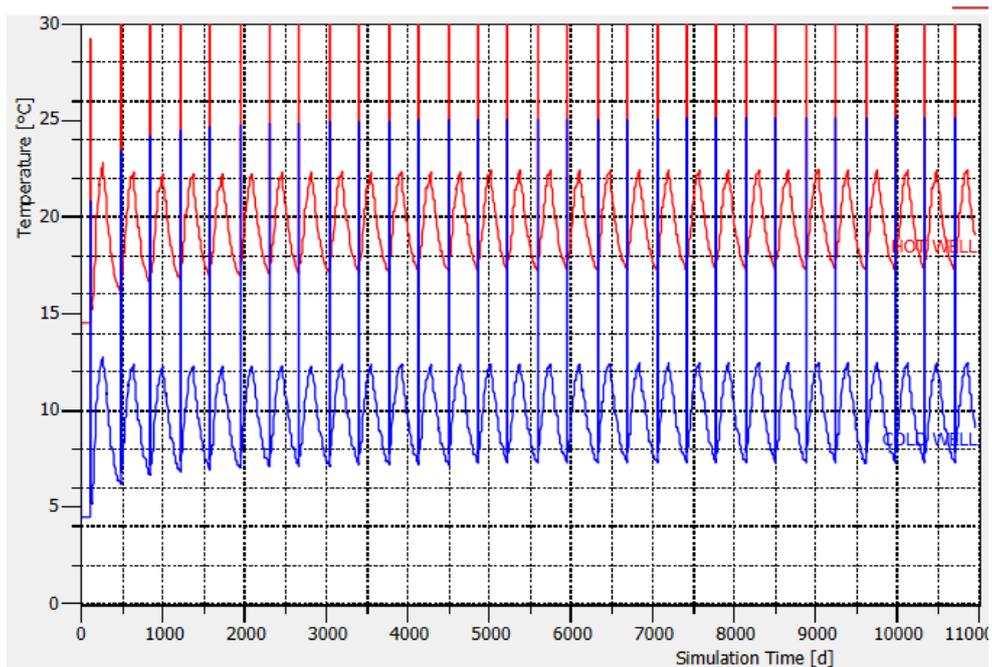
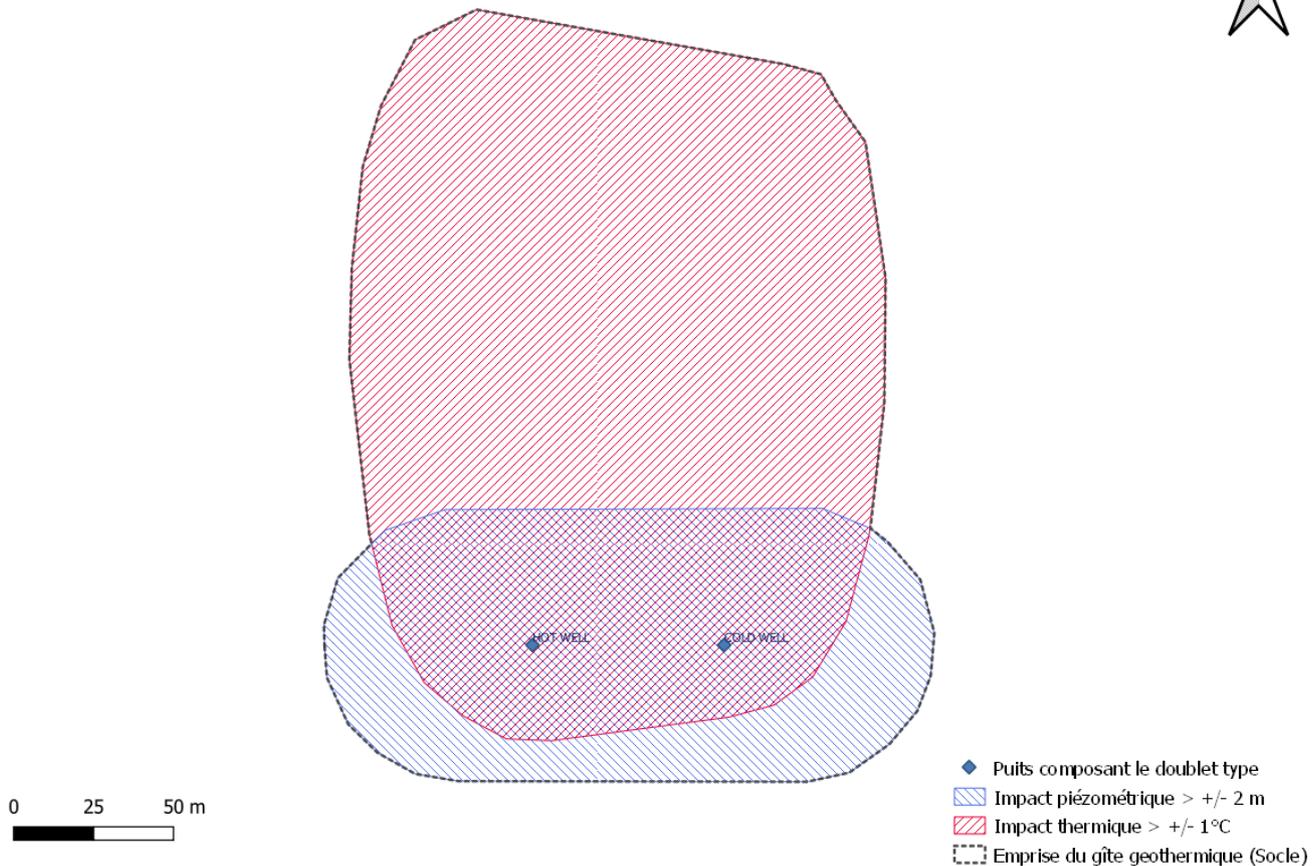


Figure 27 – Evolution de la température (°C) au droit des puits chaud et froid – Simulation en régime transitoire sur 30 ans – doublet type Socle Paléozoïque



La figure ci-dessous reprend l'emprise du gîte géothermique relative au doublet type Socle Paléozoïque :

Figure 28 – Emprise du gîte géothermique relative au doublet type Socle Paléozoïque



## 2.2.7 Modélisation d'un doublet type exploitant l'aquifère des sables du Bruxellien

### .2.2.7.1 Profil d'exploitation d'un doublet type

Il y a lieu de noter qu'aucune installation géothermique exploitant la nappe des sables du Bruxellien n'est à ce jour recensée en RBC. De ce fait, les informations du chap.2.2.4.5 sont difficilement exploitables dans le cas des sables du Bruxellien.

Les trois informations fondamentales permettant de caractériser les propriétés théoriques d'un doublet « type » exploitant la nappe des sables du Bruxellien ainsi que les hypothèses avancées pour leur détermination sont précisées ci-dessous :

- le  $\Delta T$  entre pompage et réinjection ( $^{\circ}C$ ) : la valeur de  $10^{\circ}C$  déjà retenue pour les aquifères du Landénien et du Socle est ici également reprise comme valeur par défaut,
- la distance minimale entre puits chaud et froid (m) : la valeur 60 m déjà retenue pour les aquifères du Landénien et du Socle est ici également reprise comme valeur par défaut,
- le débit de production de pointe par doublet ( $m^3/h/doublet$ ). Cette valeur est fixée à  $19.2 m^3/h$  après processus de calibration dont les résultats sont repris au chap .2.2.7.6.

Tableau 23 – Propriétés théoriques d'un doublet « type » exploitant la nappe des sables du Bruxellien

| Paramètre   | Valeur |
|---|--------|
| $\Delta T$ ( $^{\circ}C$ )                                    | 10     |
| Débit de production de pointe par doublet ( $m^3/h/doublet$ ) | 19.2   |
| Puissance géothermique de pointe par doublet (kW/doublet)     | 222.9  |
| Distance minimale entre puits chaud et froid (m)              | 60     |

Le tableau ci-dessous reprend, pour un doublet type exploitant la nappe des sables du Bruxellien, le bilan d'exploitation mensuel sur une année complète du point de vue :

- des débits d'exploitation de nappe moyens et maximaux (paramètres *Monthly flowrate* et *Maximum flowrate* exprimés en  $m^3/h$ ),
- des puissances géothermiques moyennes et maximales déployées (paramètres *P ground monthly* et *P ground max* exprimés en kW),
- de la production géothermique (paramètre *E ground monthly* exprimé en kWh).

Ce bilan est obtenu par application des coefficients (coef / *P ground max*) synthétisés au chap.2.2.4.4 sur les propriétés théoriques du doublet type.



Tableau 24 – Bilan d'exploitation mensuel sur une année complète (Bruxellien)

| Month                          | Monthly flowrate (m <sup>3</sup> /h) | Maximum flowrate (m <sup>3</sup> /h) | P ground monthly (kW) | P ground max (kW) | E ground monthly (kWh/month) |
|--------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|-------------------|------------------------------|
| 1                              | 3,6                                  | 8,9                                  | 42,1                  | 103,9             | 33.786                       |
| 2                              | 3,2                                  | 8,0                                  | 37,0                  | 93,3              | 27.082                       |
| 3                              | 2,4                                  | 6,2                                  | 27,8                  | 72,4              | 22.410                       |
| 4                              | 1,1                                  | 5,5                                  | 13,1                  | 63,8              | 10.965                       |
| 5                              | -0,6                                 | -12,2                                | -7,5                  | -141,9            | -9.019                       |
| 6                              | -4,3                                 | -19,2                                | -50,1                 | -222,9            | -41.445                      |
| 7                              | -5,6                                 | -19,1                                | -65,6                 | -222,5            | -54.127                      |
| 8                              | -4,5                                 | -19,0                                | -51,8                 | -220,7            | -43.865                      |
| 9                              | -1,4                                 | -18,5                                | -15,9                 | -215,6            | -16.608                      |
| 10                             | 1,0                                  | 6,8                                  | 11,5                  | 79,4              | 10.483                       |
| 11                             | 2,6                                  | 7,3                                  | 29,9                  | 84,9              | 23.585                       |
| 12                             | 3,3                                  | 9,5                                  | 37,9                  | 110,9             | 3.834                        |
| Balance (kWh)                  |                                      |                                      |                       |                   | -32.918                      |
| Total Energy (kWh)             |                                      |                                      |                       |                   | 297.211                      |
| Total Energy for heating (kWh) |                                      |                                      |                       |                   | 132.146                      |
| Total Energy for cooling (kWh) |                                      |                                      |                       |                   | 165.065                      |

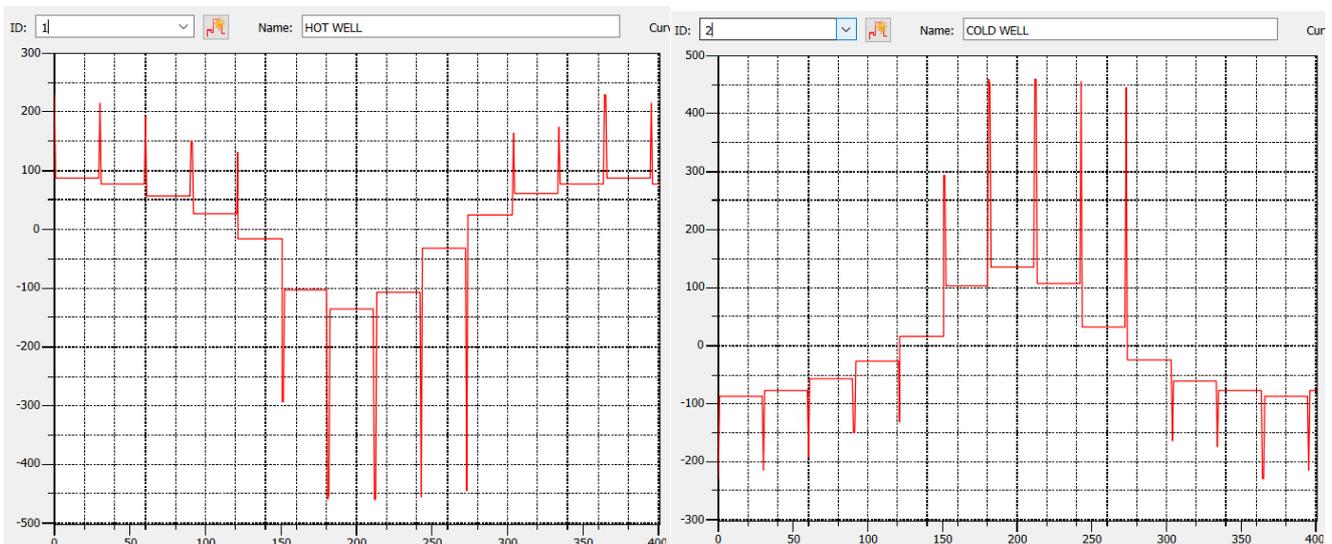
Vis-à-vis des simulations FEFLOW réalisées sur le doublet type, nous émettons les hypothèses ci-dessous :

- exploitation à puissance/débit moyen mensuel par défaut ;
- à la fin de chaque mois, exploitation à puissance/débit maximum observé sur le mois durant 24h.

Ceci va permettre d'optimiser le temps de calcul sur 30 ans tout assurant une approche conservative vis-à-vis des simulations générées du fait de la génération d'un pic d'exploitation de 24 h à puissance/débit maximum à la fin de chaque mois.

Les figures ci-dessous reprennent les chroniques de débit d'exploitation sur une année tels qu'appliqués au logiciel FEFLOW pour le doublet type Bruxellien (exprimés en m<sup>3</sup>/jour). Les valeurs appliquées au puits froid sont fatalement l'inverse des valeurs appliquées au puits chaud :

Figure 29 – Chroniques de débit d'exploitation sur une année tels qu'appliqués au logiciel FEFLOW pour le doublet type Bruxellien (exprimés en m<sup>3</sup>/jour)



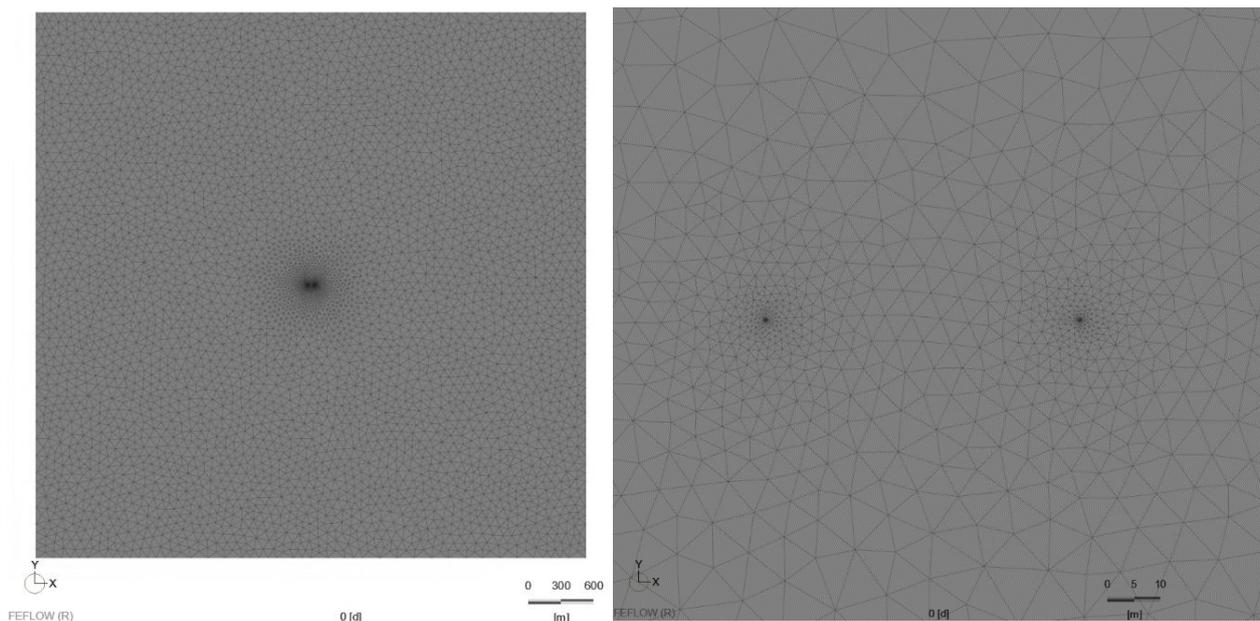
## .2.2.7.2 Maillage en éléments finis

Le tableau ci-dessous reprend les paramètres du maillage en éléments finis appliqué au modèle :

Tableau 25 – Paramètres du maillage en éléments finis appliqué au modèle (Bruxellien)

| Paramètres                              | Valeurs   |
|---|---|
| Longueur domaine                        | 5000 m  |
| Largeur domaine                         | 5000 m  |
| Type maillage                           | Eléments finis  |
| Nombre éléments                         | 11008   |
| Nombre nœuds                            | 5599  |
| Distance entres puits chaud et froid    | 60 m<br>Etant donné l'absence d'installation exploitant l'aquifère des sables Bruxellien en RBC, une interdistance de 60 m est par défaut appliquée, comme pour les aquifères Landénien et Socle. |
| Orientation de l'implantation des puits | Implantation orientée selon un axe longitudinal Est-Ouest (perpendiculairement au sens d'écoulement de la nappe)  |
| Raffinage maillage                      | Jusqu'à 0.1 m au droit des points d'implantation du doublet.  |
| Nombre de couches                       | 12  |
| Mode                                    | Phreatic  |

Figure 30 – Maillage en éléments finis tel qu'appliqué au logiciel FEFLOW (Bruxellien)



### .2.2.7.3 Modèle géologique

Le tableau ci-dessous reprend les éléments ayant permis la construction de la structure 3D du modèle relatif à l'aquifère cible :

Tableau 26 – Eléments ayant permis la construction de la structure 3D du modèle relatif à l'aquifère cible (Bruxellien)

| Paramètre   | Valeur                            | Détails   |
|---|-----------------------------------|---|
| Toit de l'aquifère des sables Bruxellien                | Moyenne arithmétique = 61.4 m DNG | Le modèle ne tient pas compte des processus d'écoulement au sein de la zone non saturée. La valeur d'épaisseur non saturée n'a donc pas d'effet sur les simulations. Par simplification, le toit de l'aquifère est fixé à la valeur de la piézométrie de mai 2013 <a href="#">BPSM</a> .  |
| Epaisseur (saturée) de l'aquifère des sables Bruxellien | Moyenne arithmétique = 16.26 m    | <p>Selon données du modèle géologique <a href="#">BRUSTRATI3D v1.1</a> et du modèle hydrogéologique <a href="#">BPSM</a></p> <p>Ce calcul est réalisé au droit de l'extension de l'aquifère de sables du Bruxellien respectant une épaisseur saturée minimale de 10 m (hypothèse de condition technique minimale pour assurer un fonctionnement pérenne d'une installation géothermique exploitant cet aquifère). Cf. chap .2.2.4.3</p> |

### .2.2.7.4 Conditions aux limites

Le tableau ci-dessous reprend les conditions aux limites appliquées au modèle :

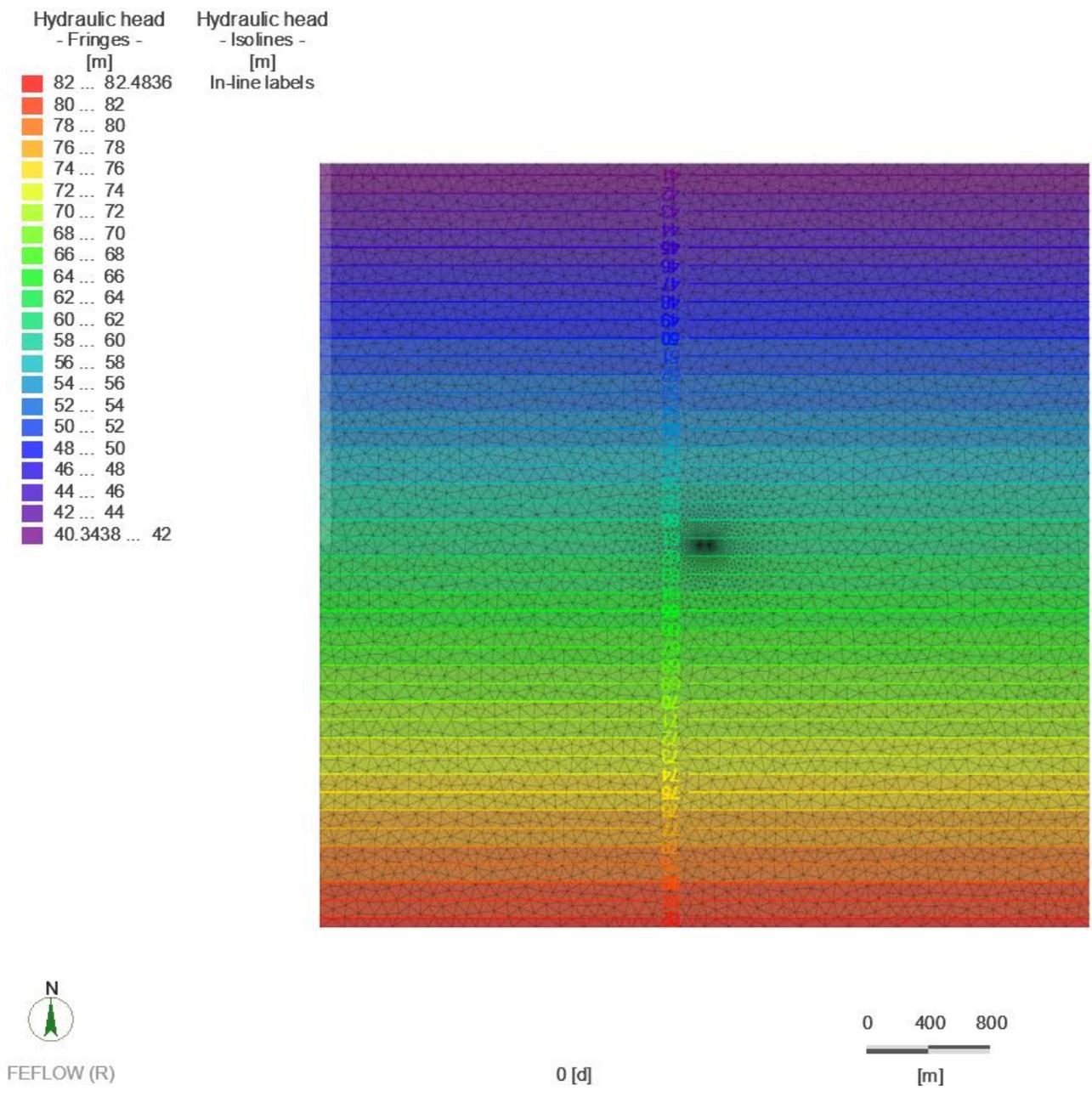
Tableau 27 – Conditions aux limites appliquées au modèle (Bruxelles)

| Limite                | Condition                                   | Détails  |
|-----------------------|---|--|
| Sud (amont)           | Potentiel imposé = +82.48 m DNG (Dirichlet) | <p>Selon piézométrie de mai 2013 <a href="#">BPSM</a></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Piézométrie statique moy. Estimée à + 61.4 m DNG</li> <li>• Gradient hydraulique moy. Estimé à 0.84 %</li> </ul> <p>Ce calcul est réalisé au droit de l'extension de l'aquifère de sables du Bruxellien respectant une épaisseur saturée minimale de 10 m (hypothèse de condition technique minimale pour assurer un fonctionnement pérenne d'une installation géothermique exploitant cet aquifère). Cf. chap .2.2.4.3</p> |
| Nord (aval)           | Potentiel imposé = +40.34 m DNG (Dirichlet) |  |
| Bordures Est et Ouest | Flux imposé = 0 (Neumann)                   | Limites à flux nul   |



La figure ci-dessous reprend la piézométrie statique telle que modélisée sur FEFLOW après application des conditions aux limites :

Figure 31 – Piézométrie statique telle que modélisée sur FEFLOW après application des conditions aux limites (Bruxellien)



## .2.2.7.5 Propriétés du sous-sol

### .2.2.7.5.1 Propriétés hydrodynamiques et hydrodispersives

Le tableau ci-dessous reprend la synthèse des propriétés hydrodynamiques et hydrodispersives appliquées au modèle :

Tableau 28 – Synthèse des propriétés hydrodynamiques et hydrodispersives (Bruxellien)

| Paramètre                             | Valeur  | Détails   |
|---------------------------------------|---|---|
| Conductivité hydraulique              | $K_h = 2.0E-4$ m/s<br>Pour les conductivités hydrauliques verticales ( $K_v$ ) ont émet l'hypothèse suivante : $K_v = K_h/10$ | Valeur de référence renseignée sur <a href="#">BrugeoTool</a>                   |
| Coefficient d'emménagement spécifique | $1E-5$ m-1  | Littérature : Freeze and Cherry (1979) / Carter and Bentley (1991)              |
| Porosité efficace                     | 25%   | Littérature : Johnson (1967) / Kresic (2007)                                    |
| Dispersivité longitudinale            | 5 m   | Littérature : Gelhar, et al. (1992) / Freeze and Cherry (1979) / Marsily (1986) |
| Dispersivité transversale             | 0.5 m   | Littérature : Gelhar, et al. (1992) / Freeze and Cherry (1979) / Marsily (1986) |

### .2.2.7.5.2 Propriétés thermiques

Le tableau ci-dessous reprend la synthèse des propriétés thermiques appliquées au modèle :

Tableau 29 – Synthèse des propriétés thermiques (Bruxellien)

| Paramètre                                      | Valeur                    | Détails   |
|--|---------------------------|---|
| Température                                    | 13 °C                     | Valeur de référence estimée selon données <a href="#">BRUWATER</a>  |
| Capacité calorifique vol. eau sout.            | 4.15 MJ/m <sup>3</sup> /K | NIT 259 (BuildWise)   |
| Conductivité thermique eau sout.               | 0.59 W/m/K                | NIT 259 (BuildWise)   |
| Capacité calorifique vol. sables du Bruxellien | 2.5 MJ/m <sup>3</sup> /K  | NIT 259 (BuildWise)<br><br>Valeur représentative de la formation des sables de Bruxelles, constituant la majeure partie de l'aquifère des sables du Bruxellien                        |
| Conductivité thermique sables du Bruxellien    | 2.6 W/m/K                 | Selon <a href="#">Gerard P et al. 2020</a><br><br>Valeur représentative de la formation des sables de Bruxelles, constituant la majeure partie de l'aquifère des sables du Bruxellien |



### .2.2.7.6 Calibration

La calibration du modèle numérique est réalisée en régime permanent et consiste à reproduire numériquement un rabattement/remontée de nappe de l'ordre de +/-5 m par pompage/réinjection au droit du doublet type. En effet, un rabattement de -5 m est considéré arbitrairement comme une limite technique à ne pas dépasser pour assurer un fonctionnement pérenne d'une installation géothermique exploitant l'aquifère des sables du Bruxellien, tenant compte d'une épaisseur saturée disponible de 10 m (condition jugée minimale pour rappel – cf chap .2.2.4.3).

Il y a lieu de préciser que cette valeur est ici théorique et pourrait s'avérer limitante dans le cas d'un site disposant d'une épaisseur saturée significativement supérieure à 10 m.

Du fait de l'absence d'installation géothermique exploitant le Bruxellien en RBC (cf chap .2.2.4.5) mais de la disponibilité de données définissant les propriétés hydrodynamiques moyennes de l'aquifère (cf chap .2.2.7.5.1), la calibration s'est focalisée essentiellement sur l'ajustement du débit de pompage/réinjection.

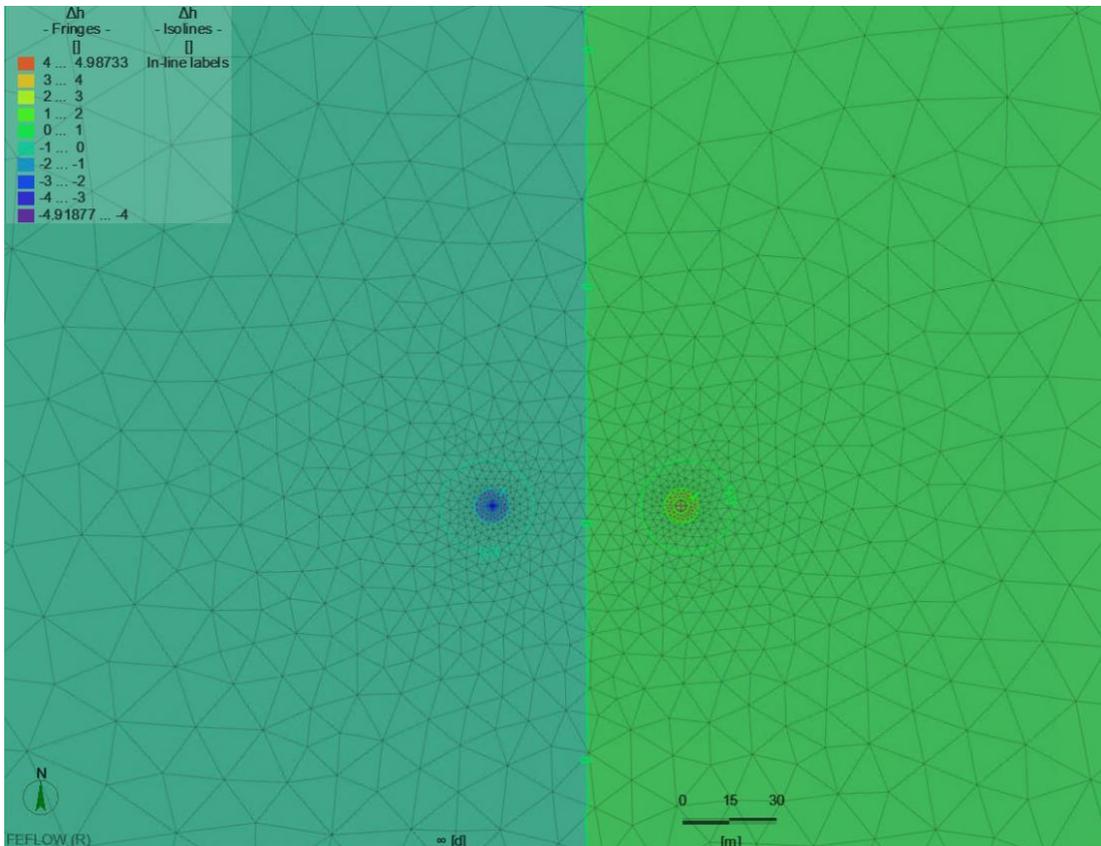
Le tableau ci-dessous reprend les résultats de calibration :

Tableau 30 – Calibration / Paramètres de l'essai et résultats de simulation (Bruxellien)

| Paramètre                         | Valeur                 |
|-----------------------------------|------------------------|
| Débit simulé                      | 19.2 m <sup>3</sup> /h |
| Durée                             | ∞ (Régime permanent)   |
| Rabattement/Remontée max projetés | -5 m / +5 m            |
| Rabattement/Remontée max simulés  | -4.92 m / +4.99 m      |

La figure ci-dessous reprend le résultat de simulation en terme de rabattement/remontée de nappe pour la calibration du doublet type Bruxellien.

Figure 32 – Résultat de simulation en terme de rabattement/remontée de nappe pour la calibration du doublet type Bruxellien.



### .2.2.7.7 Simulations

Pour rappel, l'emprise du gîte géothermique est définie comme l' « aire ( $m^2$ ) d'exploitation géothermique ». Ce concept fait l'hypothèse que chaque installation géothermique a une zone d'exploitation au-delà de laquelle les impacts environnementaux en terme de piézométrie et température du sous-sol doivent respecter une valeur maximale admissible. En outre, le respect de « non superposition des emprises » doit théoriquement permettre d'assurer l'absence de conflit d'usage entre installations voisines.

Après l'implémentation de l'ensemble des données précédemment synthétisées, deux simulations ont pu être réalisées afin de déterminer l'emprise du gîte géothermique relative au doublet type Bruxellien :

- Simulation hydrodynamique en régime permanent à débit/puissance maximale, soit  $19.2 \text{ m}^3/\text{h}$  /  $222.9 \text{ kW}$ . Cette simulation est identique à celle déjà réalisée dans le cadre du processus de calibration (cf chap .2.2.7.6). Cette première simulation permet de quantifier l'emprise du gîte géothermique ( $m^2$ ) vis-à-vis des impacts piézométriques maximums  $\Delta_h$ . Au-delà de cette emprise, l'impact piézométrique sur la nappe exploitée respecte la valeur maximale de  $\pm 1.0 \text{ m}$  par rapport au niveau statique initial (soit un ordre de grandeur équivalent à 50% de l'amplitude piézométrique observée sur la période 2010-2023 pour cette nappe – cf chap .2.2.4.2),
- Simulation hydrodynamique et thermique en régime transitoire sur 30 ans selon le profil d'exploitation défini au chap .2.2.7.1. Cette seconde simulation permet de quantifier l'emprise du gîte géothermique ( $m^2$ ) vis-à-vis des impacts thermiques maximums  $\Delta_T$ . Au-delà de cette emprise, l'impact thermique sur la nappe exploitée respecte la valeur maximale de  $\pm 1.0 \text{ }^\circ\text{C}$  par rapport à la température initiale.



Les figures suivantes reprennent les résultats de simulation pour le doublet type Bruxellien :

Figure 33 – Impact piézométrique maximum ( $\Delta h$  exprimé en m) – Simulation en régime permanent à débit/puissance maximale, soit 19.2 m<sup>3</sup>/h / 222.9 kW – doublet type Bruxellien

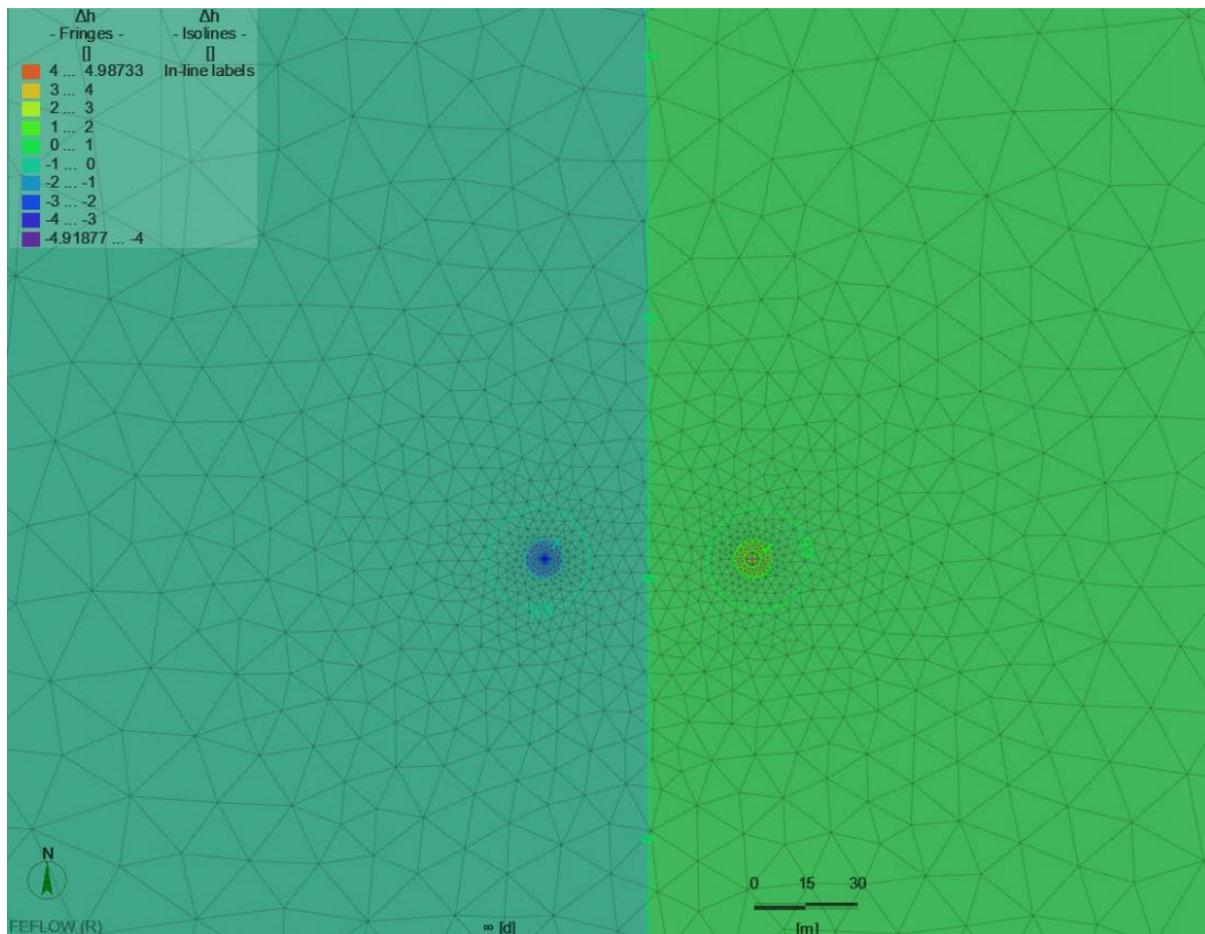


Figure 34 – Evolution de la piézométrie (m DNG) au droit des puits chaud et froid – Simulation en régime transitoire sur 30 ans – doublet type Bruxellien

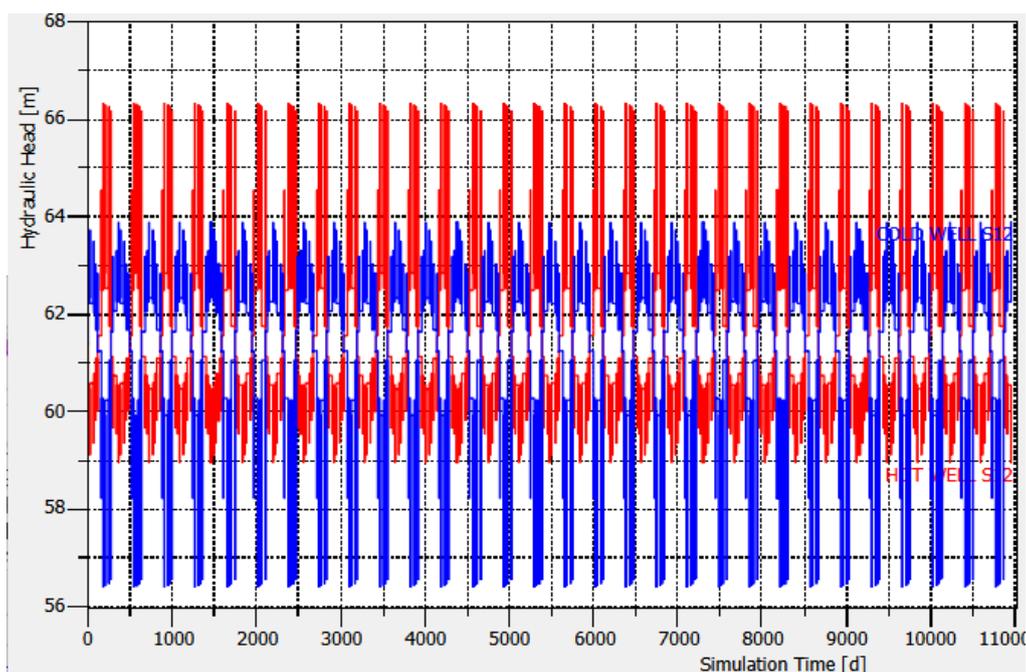


Figure 35 – Impact thermique maximum ( $\Delta T$  exprimé en  $^{\circ}\text{C}$ ) – Simulation en régime transitoire sur 30 ans – doublet type Bruxellien

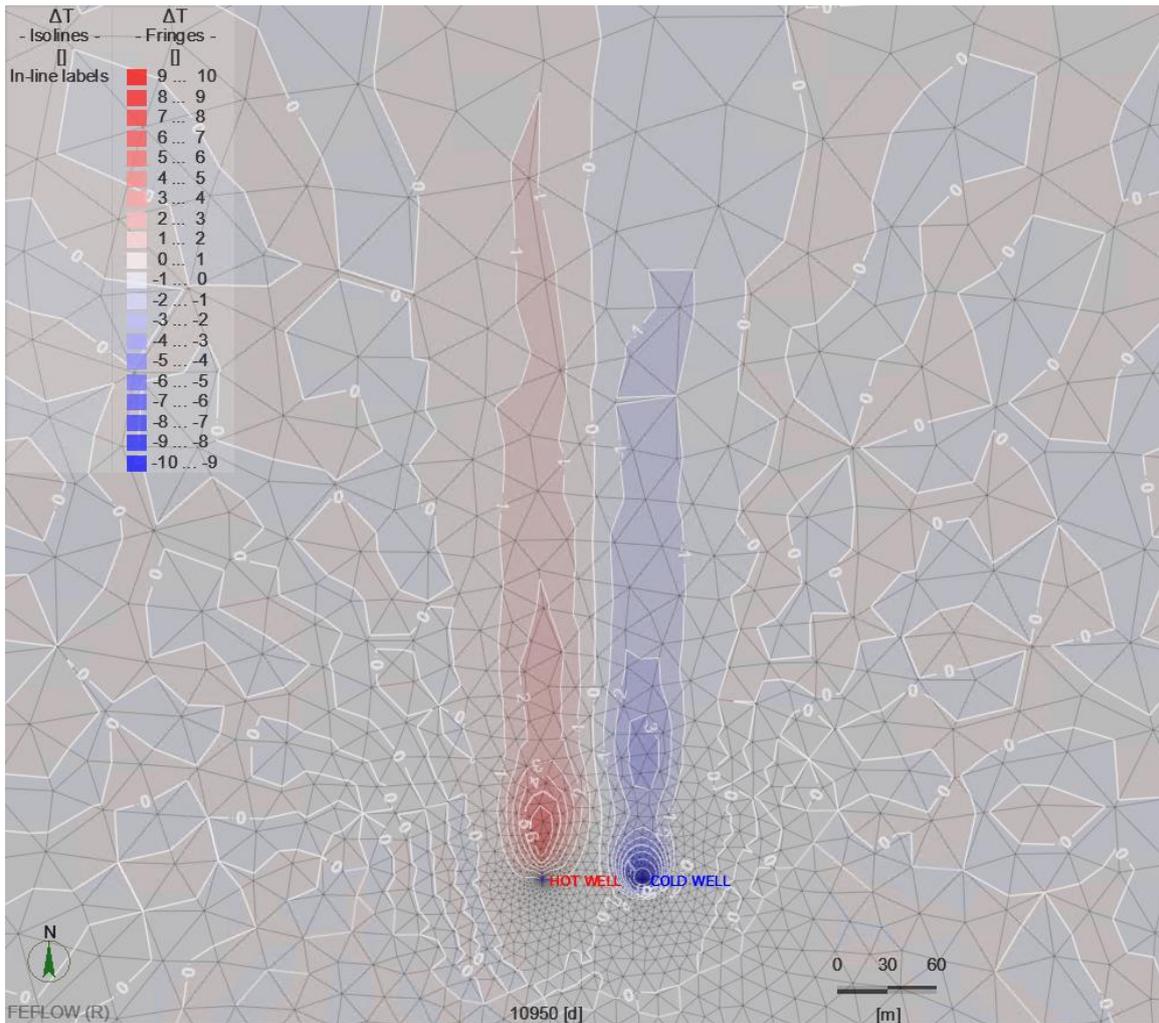
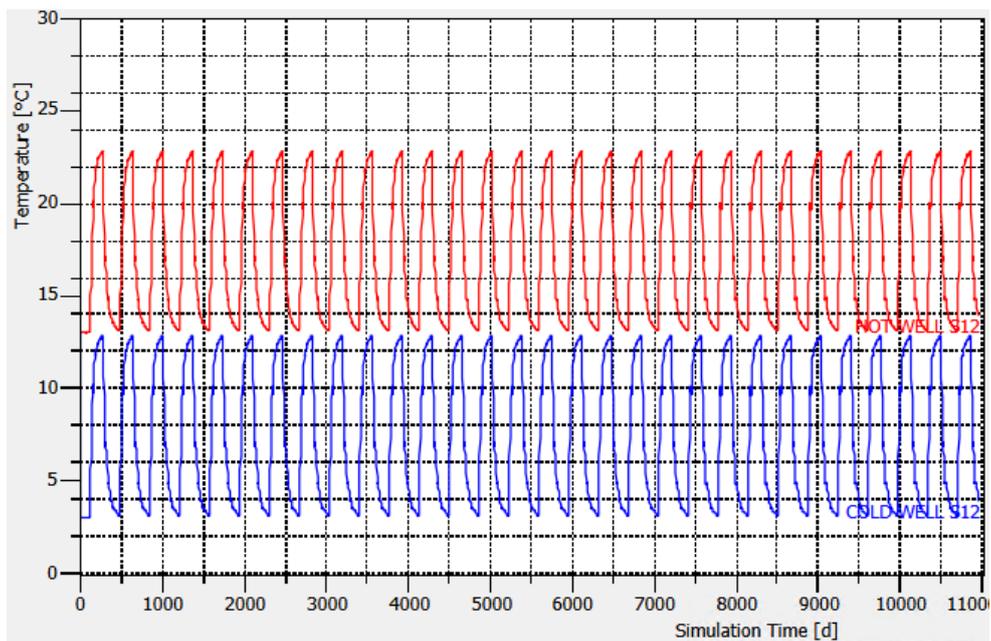
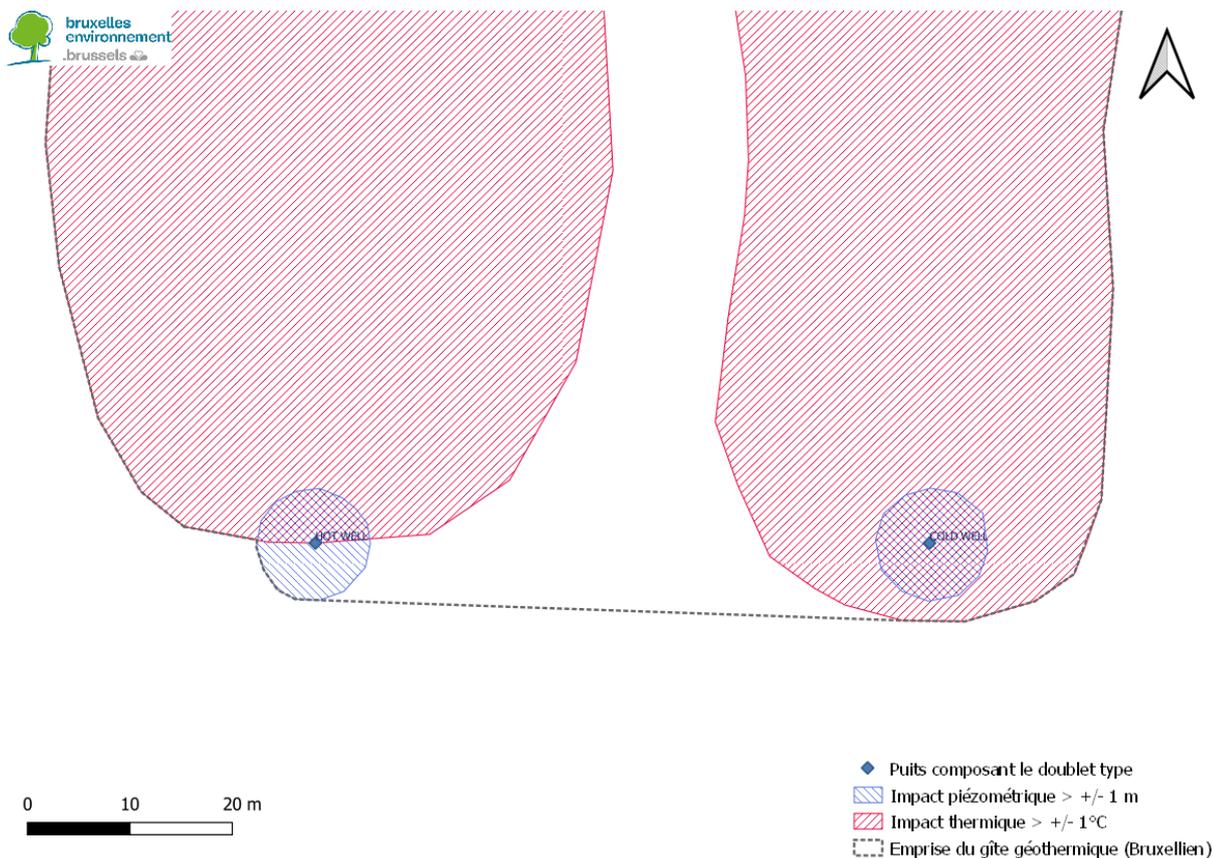
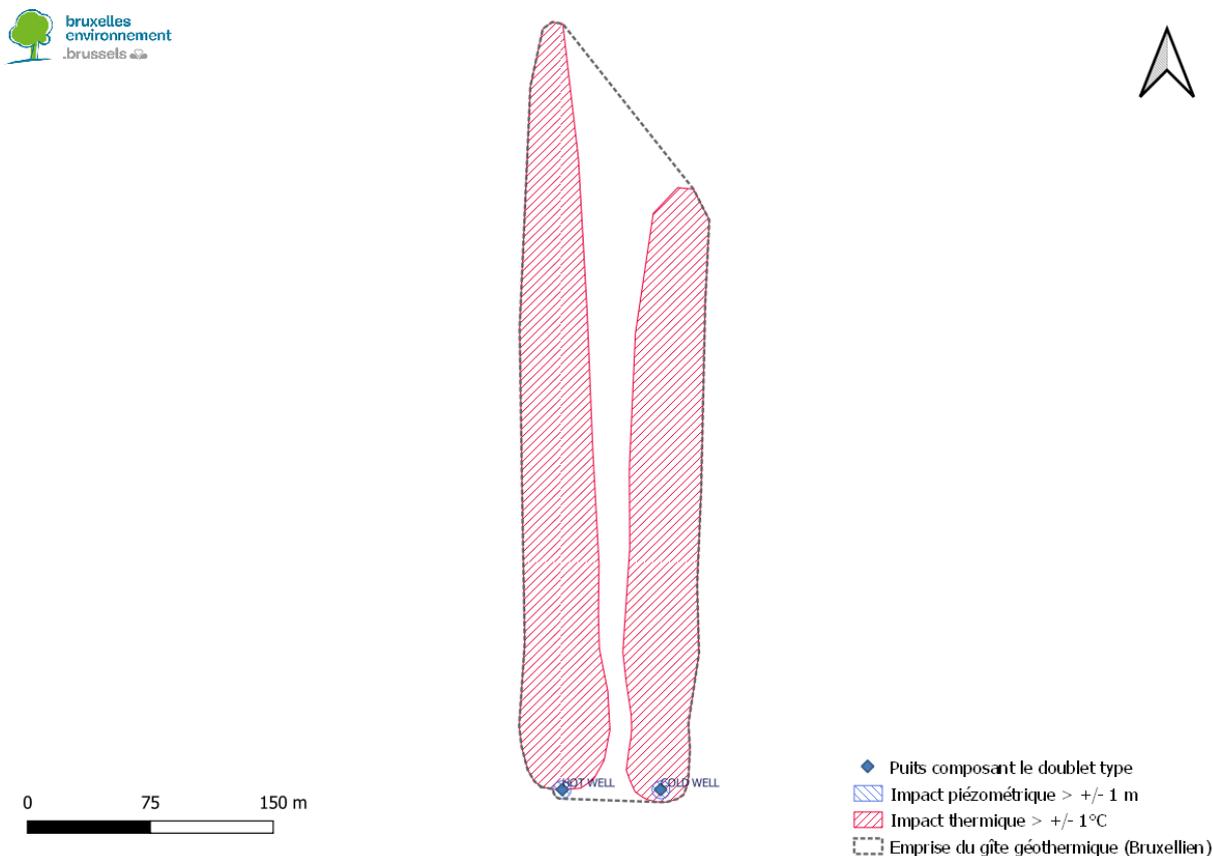


Figure 36 – Evolution de la température ( $^{\circ}\text{C}$ ) au droit des puits chaud et froid – Simulation en régime transitoire sur 30 ans – doublet type Bruxellien



La figure ci-dessous reprend l'emprise du gîte géothermique relative au doublet type Bruxellien :

Figure 37 - Emprise du gîte géothermique relative au doublet type Bruxellien



## 2.2.8 Conclusion du potentiel théorique de la géothermie sur nappe en RBC

La présente note s'intéresse à la **quantification du potentiel géothermique** théorique des unités hydrogéologiques aquifères présentes au droit du territoire de la **Région de Bruxelles-Capitale (RBC)** et jugées compatibles avec un usage géothermique en système ouvert (très basse énergie) :

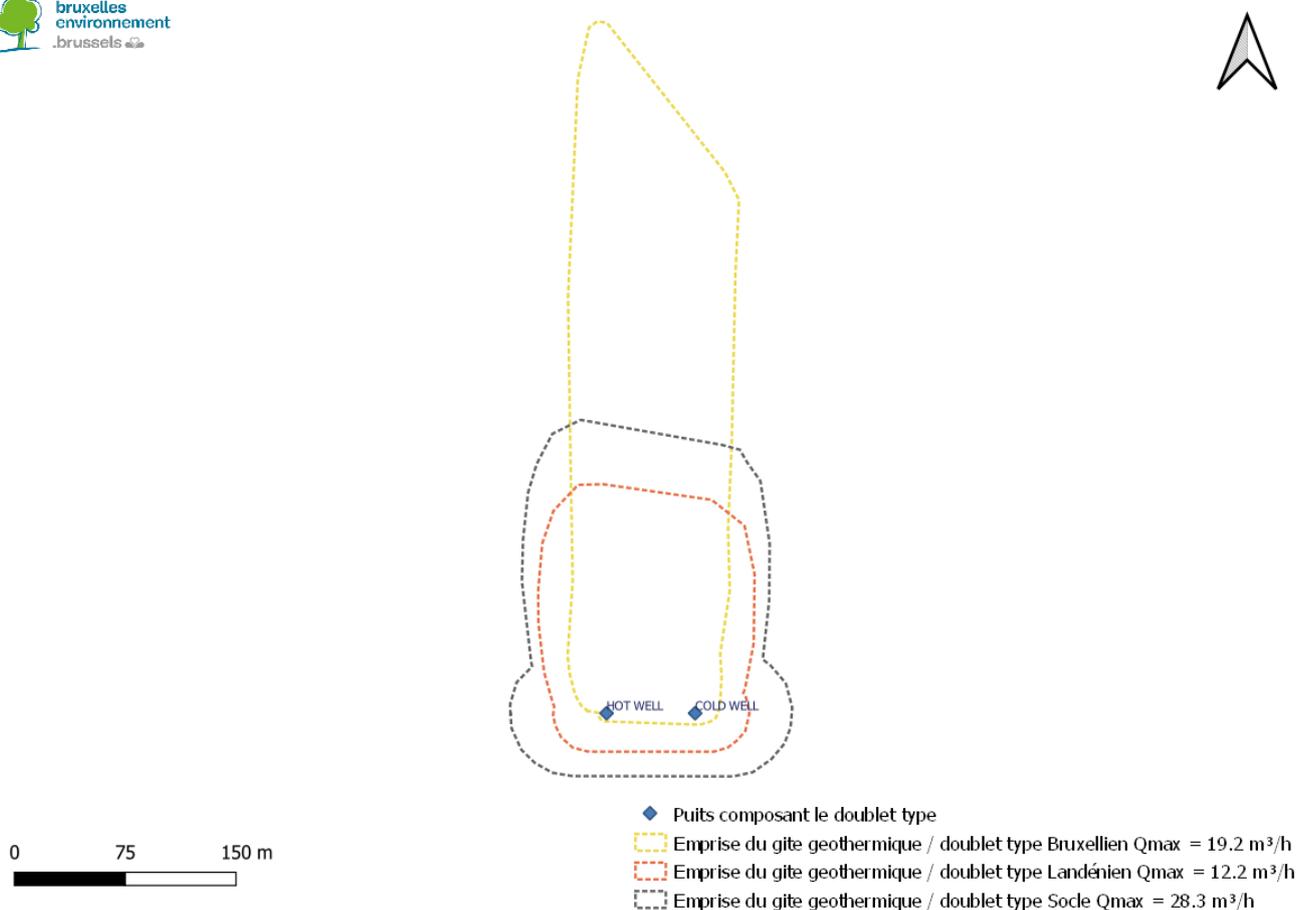
- **Aquifère des sables du Bruxellien / Eocène moyen** (UH/RBC\_4 Aquifère des sables de Wemmel, Lede, Bruxelles et Vlierzele),
- **Aquifère des sables du Landénien / Paléocène supérieur** (UH/RBC\_8 Système aquifère des sables du Landénien),
- **Aquifère du Socle Paléozoïque / Cambrien** (UH/RBC\_9b Système aquifère du Socle Paléozoïque).

La méthodologie générale appliquée a consisté en la construction d'un modèle numérique reproduisant l'environnement hydrogéologique « moyen » de chaque aquifère cible en RBC et la réalisation de simulations hydrodynamiques et thermiques sur le logiciel FEFLOW reproduisant l'exploitation sur 30 ans d'un « doublet type » (pompage/réinjection) selon des conditions d'exploitation jugées représentatives d'une exploitation « moyenne » en RBC.

Ceci a permis la quantification, pour chaque doublet type, de l'emprise du gîte géothermique définie comme l'« aire (m<sup>2</sup>) d'exploitation géothermique ». Ce concept fait l'hypothèse que chaque installation géothermique a une zone d'exploitation au-delà de laquelle les impacts environnementaux en terme de piézométrie et température du sous-sol doivent respecter une valeur maximale admissible. En outre, le respect de « non superposition des emprises » doit théoriquement permettre d'assurer l'absence de conflit d'usage entre installations voisines.

La figure ci-dessous reprend l'emprise du gîte géothermique relative aux doublets type Bruxellien, Landénien et Socle :

Figure 38 - Emprise des gîtes géothermiques relative aux doublets type Bruxellien, Landénien et Socle



Le calcul de potentiel géothermique des aquifères du Bruxellien, Landénien et Socle à l'échelle du doublet type a pu être extrapolé sur le territoire de la RBC. Le tableau ci-dessous reprend ces éléments :

Tableau 31 - Potentiel géothermique des aquifères du Bruxellien, Landénien et Socle en RBC

|   | Aquifère des sables du Landénien | Aquifère du Socle Paléozoïque | Aquifère des sables du Bruxellien |
|---|----------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| Débit de production de pointe par doublet (m <sup>3</sup> /h/doublet) | 12,2                             | 28,3                          | 19,2                              |
| Energie soutirée au sous-sol en chaud (kWh/an)                        | 84114                            | 195117                        | 132146                            |
| Energie soutirée au sous-sol en froid (kWh/an)                        | 105067                           | 243722                        | 165065                            |
| <b>Energie totale soutirée au sous-sol (kWh/an)</b>                   | <b>189181</b>                    | <b>438839</b>                 | <b>297211</b>                     |
| Puissance maximale soutirée au sous-sol en chaud (kW)                 | 70,6                             | 163,7                         | 110,9                             |
| Puissance maximale soutirée au sous-sol en froid (kW)                 | 141,9                            | 329,1                         | 222,9                             |
| <b>Puissance maximale soutirée au sous-sol (kW)</b>                   | <b>141,9</b>                     | <b>329,1</b>                  | <b>222,9</b>                      |
| Surface de l'emprise du gîte géothermique (m <sup>2</sup> )           | 23900                            | 38406                         | 46436                             |
| Potentiel géothermique surfacique Théorique (kW/m <sup>2</sup> )      | 0,0059                           | 0,0086                        | 0,0048                            |
| Potentiel géothermique surfacique Théorique (kWh/m <sup>2</sup> /an)  | 7,9                              | 11,4                          | 6,4                               |
| Surface de l'aquifère exploitable (m <sup>2</sup> )                   | 152.718.563                      | 120.647.665                   | 53.183.525                        |
| <b>Potentiel géothermique total théorique (GW)</b>                    | <b>0.90</b>                      | <b>1.04</b>                   | <b>0.26</b>                       |
|   | <b>2.20</b>                      |                               |                                   |
| <b>Potentiel géothermique total théorique (GWh/an)</b>                | <b>1206</b>                      | <b>1375</b>                   | <b>340</b>                        |
|   | <b>2921</b>                      |                               |                                   |



### 3 CONCLUSION

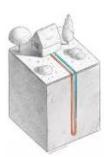
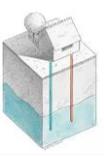
La Région de Bruxelles-Capitale (RBC) dispose d'un potentiel géothermique reconnu sur les 200 à 300 premiers mètres de profondeur. On estime qu'au-delà de 300 mètres, le potentiel géothermique est très limité rendant improbable tout potentiel en géothermie profonde (roches profondes du Socle Paléozoïque considérées peu perméables en l'état des connaissances acquises). Dans ce contexte, le type de géothermie déployable en RBC se limite à la **géothermie très basse énergie** (chauffage assisté par PAC et/ou refroidissement).

Ce rapport a quantifié le **potentiel technique brut** d'énergie renouvelable relatif aux technologies de **géothermie sur nappe (boucle ouverte) et sur champ de sondes géothermiques (boucle fermée)** en région de Bruxelles-Capitale. Cette quantification correspond au potentiel brut accessible, c'est-à-dire considérant tous les espaces et ressources disponibles sans autre contrainte.

Le potentiel technique brut :

- **en géothermie sur sondes (boucle fermée)** a été quantifié par le bureau d'étude Resolia (Auteur : Alexis RASSON) au travers d'une approche analytique basée sur des hypothèses d'énergie extractible par forage et de densité de sondes par unité de surface. La méthodologie et les résultats de cette étude sont détaillés au chapitre 2.1,
- **en géothermie sur nappe (boucle ouverte)** a été quantifié par Bruxelles Environnement (Auteur : Mathieu AGNIEL) au travers d'une approche numérique. La méthodologie générale appliquée a consisté en la construction d'un modèle numérique reproduisant l'environnement hydrogéologique « moyen » de chaque aquifère cible en RBC et la réalisation de simulations hydrodynamiques et thermiques sur le logiciel FEFLOW reproduisant l'exploitation sur 30 ans d'un « doublet type » (pompage/réinjection) selon des conditions d'exploitation jugées représentatives d'une exploitation « moyenne » en RBC. Ce type de simulation a *in fine* permis de quantifier une « emprise de gîte géothermique » unitaire. Par extrapolation de cette dernière sur l'emprise du territoire de la RBC, il a été alors possible de quantifier un potentiel géothermique extractible à l'échelle régionale. La méthodologie et les résultats de cette étude sont détaillés au chapitre 2.2.

Tableau 32 - Résumé des potentiels bruts en géothermie sur sondes et sur nappe au droit de la Région de Bruxelles-Capitale

|   | Potentiel technique brut en géothermie à l'échelle de la RBC         |  |
|---|--|--|
|   | Puissance max. extractible au sous-sol, en chaud comme en froid (MW) | Energie annuellement extractible au sous-sol, chaud et froid <u>cumulés</u> (GWh/an) |
| Géothermie sur <b>sondes</b> (boucle fermée)<br> | <b>5 600</b> <sup>6</sup><br>[< 12 600] <sup>7</sup>                 | <b>20 000</b> <sup>8</sup><br>[< 46 620] <sup>8</sup>                                |
| Géothermie sur <b>nappe</b> (boucle ouverte)<br> | <b>2 200</b> <sup>9</sup>  | <b>2 921</b> <sup>9</sup><br>[< 4 070] <sup>8</sup>                                  |

Ces 2 technologies possèdent donc des potentiels importants voire très important mais qu'il convient de relativiser, notamment concernant la géothermie sur sonde. Sur la base de ces quantifications, cette dernière posséderait un potentiel technique brut 6 à 10 fois supérieur à la géothermie sur nappe. Or, ce potentiel estimé en géothermie sur sonde apparaît optimiste à l'échelle de la Région car il impliquerait de pouvoir forer dans tous les espaces non-construits de la RBC, y compris en intérieur d'îlots.

<sup>6</sup> Étude Resolia / hypothèse de forages de profondeur limitée au toit du socle (approche réaliste)

<sup>7</sup> Étude Resolia / hypothèse de forages systématiques à 200 m de prof. (approche optimiste)

<sup>8</sup> Hypothèse d'un taux de charge de 1850 h/an (E=P\*1850)

<sup>9</sup> Étude Bruxelles Environnement / approche numérique



## 4 BIBLIOGRAPHIE

GEOCAMB : Geothermal Energy potential in Cambrian rocks focusing on public buildings in Brussels, C. Baudinet et.al., 2022

Brussels Phreatic System Model (BPSM), Modélisation hydrogéologique en éléments finis du système phréatique bruxellois, M. Agniel, Bruxelles Environnement, 2020

Détermination de la conductivité thermique des formations géologiques du sous-sol de la Région de Bruxelles-Capitale à des fins de pré-dimensionnement de sondes géothermiques, P. Gerard et al., Université Libre de Bruxelles (ULB), 2020

BRUSTRATI3D v1.0, Modélisation stratigraphique en 3D du sous-sol de la Région de Bruxelles-Capitale, X. Devleeschouwer, B. Meyvis, Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique, 2017.

Etude hydrogéologique de la masse d'eau souterraine des sables du Landénien - Phase 2 : Modélisation hydrogéologique, Aquale, 2016.

Etude hydrogéologique de la masse d'eau souterraine des sables du Landénien - Phase 1: Modélisation géologique, X. Devleeschouwer, B. Meyvis, Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique, 2015

NIT 259, Géothermie peu profonde. Conception et mise en œuvre de systèmes avec échangeurs en forme de U., BuildWise, 2017

SIA 384/6 «Sondes géothermiques», Société suisse des ingénieurs et des architectes, 2010

Faisabilité en géothermie ouverte du bâtiment de la gare maritime, 2019 04 01-MPOS-AGT1915-Rapport-v1, KWO Gare Maritime, Testen van KWO bronnen, AGT, 2019

Faisabilité en géothermie ouverte du bâtiment de Bruxelles Environnement, Evaluatie van de haalbaarheid op basis van een putproef, IFTECH, 2010



**Rédaction** : Mathieu AGNIEL (Bruxelles Environnement)

**Comité de lecture** : Camille Baudinet (Bruxelles Environnement), Mathieu Agniel (Bruxelles Environnement), Gilles Maes (Bruxelles Environnement), Alain Dassargues (Ulg), Alexis Rasson (Resolia)

**Ed. Resp.** : B. Dewulf & B. Willocx – Av du Port 86C/3000- 1000 Bruxelles

